

既存無線システムやヒトへの照射を回避する周波数再利用型マイクロ波電力伝送方式の研究開発 Research and Development of Frequency-Reuse Microwave Power Transfer Avoiding Existing Wireless Systems and Human Exposure

研究代表者

本間 尚樹 岩手大学
Naoki Honma, Iwate University

研究分担者

村田 健太郎 岩手大学
Kentaro Murata, Iwate University

研究期間 令和5年度～令和7年度

概要

本研究は、マイクロ波無線電力伝送（MWPT）における人体ばく露および既存無線システムへの干渉を同時に回避しつつ高効率給電を実現する、ビームフォーミング方式を提案し、5.7 GHz・32素子アレーを用いて実験的に検証した。提案法は、MWPT システム自身を用いた人体・無線局・受電器チャネルの推定、IR (Information Receiver) に対するマルチテアリング、受電電力対人体ばく露電力比の最大化に基づく最適重み計算を特徴とする。ファントムおよび通信システムを含む実環境評価により、提案法は従来法に比べて 20-40 dB 以上の干渉抑圧を達成しつつ給電効率を維持し、通信 BER (Bit-Error-Rate) も最小となることを確認した。これにより、MWPT の安全性と高効率化を両立する有効な手法であることを示した。

Abstract

This study proposes a beamforming method for Microwave Wireless Power Transfer (MWPT) that achieves high-efficiency power transmission while simultaneously mitigating human exposure and interference with existing wireless systems. The proposed method was experimentally validated using a 32-element array operating at 5.7 GHz. Its key features include channel estimation for human bodies, wireless stations, and power receivers using the MWPT system itself, null steering toward information receivers (IRs), and an optimization of antenna weights based on maximizing the ratio of received power to human exposure power. Real-world evaluations involving a phantom and a communication system confirmed that the proposed method achieves interference suppression of over 20-40 dB compared to conventional methods while maintaining power transfer efficiency and minimizing the communication Bit Error Rate (BER). These results demonstrate that the proposed approach is an effective solution for ensuring both the safety and high efficiency of MWPT systems.

1. まえがき

マイクロ波無線電力伝送（Microwave Wireless Power Transfer: MWPT）は、アレーアンテナによるビームフォーミング技術を用いて、離れた位置に存在するデバイスへ非接触で電力を供給できる手法として注目されている。特に、IoT 機器の普及に伴う電池交換や配線の負担を軽減する基盤技術として、近年、研究開発および社会実装に向けた取り組みが加速している [1-4]。我が国においても、920 MHz 帯、2.4 GHz 帯および 5.7 GHz 帯を対象とした制度整備が進められ、実利用に向けた環境が整いつつある [5, 6]。

一方で、MWPT は通信システムと比較して送信電力が大きく、既存無線システムへの与干渉や人体への電波照射といった課題が顕在化している。特に GHz 帯を用いる空間伝送型 MWPT では、人体防護指針に定められた電波防護基準を満足しつつ、高効率な給電を実現することが社会実装の前提条件となる [7-13]。このため、MWPT における電磁界制御と安全性確保の両立は、国際的にも重要な研究課題として位置付けられている。

これらの課題に対し、複数の送電局を用いる分散型 MWPT や、送電電力・動作制御に基づく安全確保手法が提案されてきた [14-22]。しかし、これらの手法は比較的低電力用途に限定される場合が多く、高効率な給電が可能なビームフォーミング型 MWPT における安全性確保は依

然として課題が残されている [23-28]。特に、人体や他の無線局の位置情報に基づく幾何情報依存型ビームフォーミング手法では、多重伝搬環境やアレー誤差の影響により、実環境での性能劣化が指摘されている [32-37]。

このような背景のもと、著者らは、MWPT システム自体を用いて人体のバイタル動作に起因するマイクロドップラ成分を検出し、送電アレーと人体との間の等価チャネルを推定する無線ヒトセンシング技術に着目した [38-45]。さらに、給電対象である受電器チャネルと人体チャネルの両方を統合的に扱い、人体への照射電力を抑圧しつつ受電電力を最大化する「人共存型エネルギービームフォーミング (Human-Aware Energy Beamforming)」を提案している [38]。本方式は、チャネル情報に基づく解析的な最適解を有し、多重伝搬やアレー誤差を内包した実環境においても高い実効性を有する点に特徴がある。

本研究開発 (SCOPE) では、上記の理論的検討に基づき、5.7 GHz 帯 MWPT システムの構築および実伝送実験を通じて、人体および既存無線局への電力照射を抑圧しながら高効率な給電を実現する手法の有効性を検証した。本成果報告書では、提案方式の原理、試作システム構成、ならびに実環境下における評価結果を通じて、本研究の成果と今後の展望について報告する。

2. 研究内容及び成果

図 1 に提案するマイクロ波無線電力伝送装置の概念図を示す。無線電力伝送装置は、センサ (SEN: SENsor) と送電機 (ET: Energy Transmitter) により人体及び既存無線システム (IR: Information Receiver)、受電器 (ER: Energy Receiver) それぞれを自動で検出し、ビームフォーミング (BF: BeamForming) により人体と IR を回避しつつ ER へ送電を行う。

まず、IR への干渉回避を保証しつつ、人体への電波ばく露の回避と ER への高効率給電を両立するビームフォーミング法について説明する。次に本研究開発において製作した無線電力伝送装置について説明する。最後に無線電力伝送装置を用いた実伝送実験の結果について報告する。

2. 1 提案ビームフォーミング法

提案 BF 法は送受共用の ET と送信専用の SEN の 2 つが協調動作するシステムを想定する。

本手法は

- (i) 人体、IR、ER チャンネルの取得
- (ii) 最適ビームフォーミングウェイトの算出

の 2 つのステップからなる。第一に、人体、IR、ER それぞれのチャンネルの取得方法について説明する。

- (i) 人体、IR、ER チャンネルの取得

・人体チャンネルの取得

図 2(a)に人体チャンネル推定の概念図を示す。人体チャンネル推定は、SEN を送信局とし、 N_{ET} 素子からなる ET を受信局としてパイスタティック SIMO (Single-Input Multiple-Output) レーダを構築し、パイロット信号に対する人体の反射信号に基づき行う。まず、無人環境下での ET の受信信号 $y_{DC} \in \mathbb{C}^{N_{ET} \times 1}$ は、SEN からの微弱な既知パイロット信号を $s_h \in \mathbb{C}$ 、SEN-ET 間の直接波を含む環境の静的なチャンネルを $h_{DC} \in \mathbb{C}^{N_{ET} \times 1}$ とすると、

$$y_{DC} = h_{DC}s_h$$

と表される。次に有人環境下での受信信号 y_h は人体チャンネルを $f \in \mathbb{C}^{N_{ET} \times 1}$ とすると、

$$y_h = (f + h_{DC})s_h$$

と表され、人体チャンネル f は、

$$f = \frac{y_h - y_{DC}}{s_h}$$

と求められる。

・ IR チャンネルの取得

図 2(b)に IR チャンネル取得の概念図を示す。IR を送信局、 N_{ET} 素子からなる ET を受信局として、送信局からのプリアンブル信号に基づき IR のチャンネルを取得する。

ET の受信信号 $y_p \in \mathbb{C}^{N_{ET} \times 1}$ は IR からの既知プリアンブル信号を $s_p \in \mathbb{C}$ 、IR-ET 間のチャンネルを $h \in \mathbb{C}^{N_{ET} \times 1}$ とすると、

$$y_p = hs_p$$

と表され、IR チャンネル h は、

$$h = \frac{y_p}{s_p}$$

と求められる。

・ ER チャンネルの推定

図 2(c)に ER チャンネル取得の概念図を示す。SEN を送信局として、 N_{ET} 素子からなる ET を受信局としてパイスタティック SIMO レーダを構築し、ER の入射電力に対する非線形な反射応答を利用して、ER チャンネル推定を行う。

SEN から強度の異なる 2 値のパイロット信号を送信す

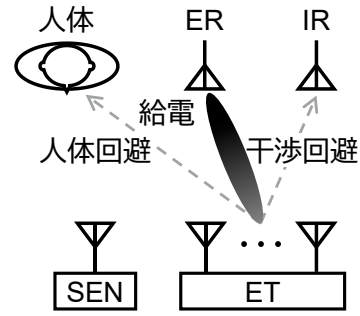
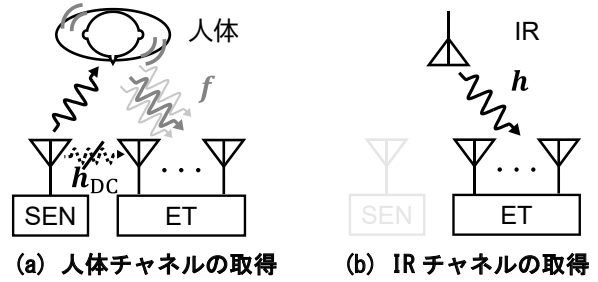
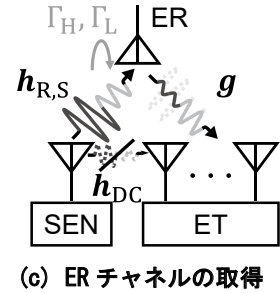


図 1 マイクロ波無線電力伝送装置



(a) 人体チャンネルの取得 (b) IR チャンネルの取得



(c) ER チャンネルの取得

図 2 各種チャンネルの取得

るとき、ER に備わるダイオードが入射電力に対して非線形な反射応答をするため、擬似的に 2 値で変調された後方散乱波が生じる。ここで、強弱信号 $s_H, s_L \in \mathbb{C}$ に対する ER の反射係数を $\Gamma_H, \Gamma_L \in \mathbb{C}$ とする。このとき、ET の受信信号 $y_H, y_L \in \mathbb{C}^{N_{ET} \times 1}$ は、

$$y_H = (g\Gamma_H h_{R,S} + h_{DC})s_H$$

$$y_L = (g\Gamma_L h_{R,S} + h_{DC})s_L$$

と表せる。なお、 $g \in \mathbb{C}^{N_{ET} \times 1}$ 及び $h_{R,S} \in \mathbb{C}$ はそれぞれ、ER-ET 及び SEN-ER 間のチャンネルである。ここで、各受信信号の第 1 項は ER からの後方散乱波成分、第 2 項は SEN-ET 間の自己干渉成分を表す。ER-ET チャンネル g の推定には後方散乱波成分のみを抽出する必要がある。このとき、送信電力に対して自己干渉成分は線形に変化するのに対して後方散乱波成分は非線形に変化する。そのため、受信信号を送信信号比でスケールリングし、減算することで、

$$\hat{g} = y_H - y_L \frac{s_H}{s_L}$$

$$\propto cg$$

が得られ、後方散乱波成分を抽出することができる。ここで、 $c \in \mathbb{C}$ は複素係数である。抽出された信号 $\hat{g} \in \mathbb{C}^{N_{ET} \times 1}$ は ER-ET チャンネル g と等価となるため、これに基づき BF を行うことで、高効率給電が期待できる。

(ii) 最適ビームフォーミングウェイトの算出

第二に、IR への干渉回避を保証しつつ、人体への電波ばく露の回避と ER への高効率給電を両立する最適ビームフォーミングウェイトの算出について説明する。

・IR に対するヌルステアリング

図 3 に IR に対するヌルステアリングの概念図を示す。推定した IR チャネルの全空間から雑音空間を抽出することで、IR に対してヌルステアリングを行う。

IR チャネル h の相関行列 $R = h^H h$ を固有値分解することで、

$$R = V \Lambda V^H$$

を得る。ただし、 V^H は行列の複素共役転置を表す。ここで $\Lambda \in \mathbb{R}^{N_{ET} \times N_{ET}}$ と $V \in \mathbb{C}^{N_{ET} \times N_{ET}}$ は、それぞれ固有値を対角要素に持つ対角行列、固有ベクトルから成るユニタリ行列を示す。IR が単一であるため、 V のうち、最大固有値に対応する固有ベクトルは、IR の信号空間に対応する。一方、これより下位の固有値に対応する固有ベクトル $\tilde{V} \in \mathbb{C}^{N_{ET} \times (N_{ET}-1)}$ は、雑音空間に対応する。ET に適用する BF ウェイト w は、 $\tilde{w} \in \mathbb{C}^{N_{ET}-1}$ の重み付けに基づく、雑音空間に対応する固有ベクトル $\tilde{V}$ の一次結合 $w = \tilde{V} \tilde{w}$ として定義することで、IR に対しヌルステアリングをしつつ、任意の BF を可能とする。

・受電電力対人体ばく露電力比の最大化

図 4 に示すように、IR へヌルステアリングをしつつ、人体への電波ばく露の回避と ER への高効率給電を両立するために、受電電力対人体ばく露電力を最大化する $\tilde{w}$ を求める。ここで、受電電力を P_R 、人体ばく露電力を P_H とすると、

$$P_R = \text{Tr}(w w^H g^H g) = \tilde{w}^H \tilde{V}^H g^H g \tilde{V} \tilde{w}$$

$$P_H \propto \text{Tr}(w w^H f^H f) = \tilde{w}^H \tilde{V}^H f^H f \tilde{V} \tilde{w}$$

と表されるため、電力比 η は

$$\eta = \frac{P_R}{P_H} \propto \frac{\tilde{w}^H \tilde{V}^H g^H g \tilde{V} \tilde{w}}{\tilde{w}^H \tilde{V}^H f^H f \tilde{V} \tilde{w}}$$

となる。受電電力 P_R の向上と人体ばく露電力 P_H の低減を両立する最適 BF ウェイト $\tilde{w}^*$ は、 $\tilde{w}$ を決定変数とした一般化レイリー商である電力比 η の最大化問題を解くことで導出可能となる。

推定した人体チャネルの相関行列 $f^H f$ を固有値分解し、

$$\tilde{w}^H \tilde{V}^H f^H f \tilde{V} \tilde{w} = \tilde{w}^H \tilde{V}^H V_H \Lambda_H V_H^H \tilde{V} \tilde{w} = x^H x$$

と変形する。ここで、 $V_H \in \mathbb{C}^{(N_{ET}-1) \times (N_{ET}-1)}$ 、 $\Lambda_H \in \mathbb{R}^{(N_{ET}-1) \times (N_{ET}-1)}$ はそれぞれ固有ベクトルから成るユニタリ行列、固有値を対角要素に持つ対角行列を示す。ここで新たに

$$x = \Lambda_H^{-\frac{1}{2}} V_H^H \tilde{V} \tilde{w}$$

と定義する。 $f^H f$ はエルミート行列であり、正定値であるため

$$\tilde{V} \tilde{w} = V_H \Lambda_H^{-\frac{1}{2}} x$$

となるので、電力比 η は

$$\eta \propto \frac{\tilde{w}^H \tilde{V}^H g^H g \tilde{V} \tilde{w}}{\tilde{w}^H \tilde{V}^H f^H f \tilde{V} \tilde{w}} = \frac{x^H \Lambda_H^{-\frac{1}{2}} V_H^H g^H g V_H \Lambda_H^{-\frac{1}{2}} x}{x^H x} = \frac{x^H R' x}{x^H x}$$

と式変形が可能である。 x はそのノルムで規格化されるため、 $|x|$ の大きさ自体は電力比 η に影響しない。したがって、電力比 η を最大化するためには、 x を行列 R' の最大固有値に対応する固有ベクトル $x_{\max}$ とすればいい。すなわち、

$$R' = V' \Lambda' V'^H$$

$$V' = [v'_1, \dots, v'_{N_{ET}-1}]$$

$$\Lambda' = \text{diag}[\lambda'_1, \dots, \lambda'_{N_{ET}-1}] \quad (\text{ただし、} \lambda'_1 \geq \dots \geq \lambda'_{N_{ET}-1})$$

とした場合に、 $x = v'_1$ とすれば良い。しかし、この x はウェイトのノルムが担保されないため、

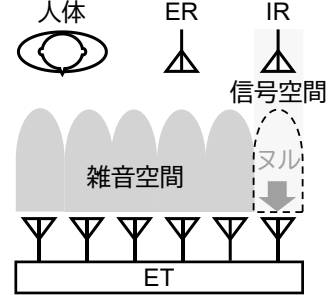


図 3 IR に対するヌルステアリング

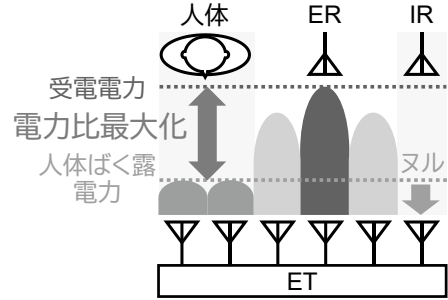


図 4 電力比最大化

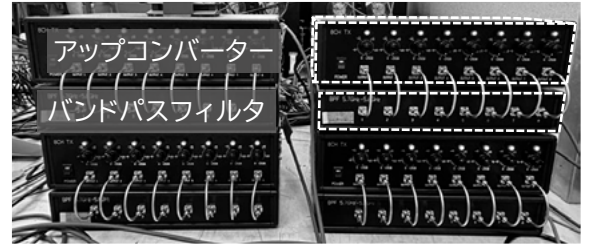


図 5 32ch アップコンバータ・バンドパスフィルタ

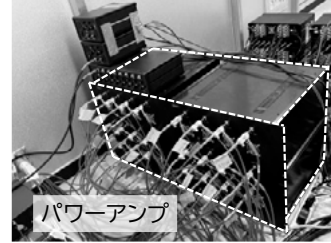


図 6 32ch パワーアンプアレー



図 7 32 素子半波長間隔リニアパッチアレー

$$\tilde{w}^* = \frac{V_H \Lambda_H^{-\frac{1}{2}} x_{\max}}{\left\| V_H \Lambda_H^{-\frac{1}{2}} x_{\max} \right\|_2}$$

のように規格化する。ここで $\|\cdot\|_2$ はベクトルのユークリッドノルムを表す。

上記のように算出された最適ウェイト $\tilde{w}^*$ を $w = \tilde{V} \tilde{w}$ に代入することで、干渉回避を保証しつつ人体ばく露回避と高効率給電を両立する最適 BF ウェイト w^* が求められる。

受電電力最大化と干渉抑圧を同時に達成するためには、振幅および位相を自由に制御可能なビームフォーミングが必要となる。しかしながら、本研究では、送信機の高効率化および実装容易性を考慮し、各アンテナ素子の振幅を等振幅に制約した位相制御型ビームフォーミングを採用

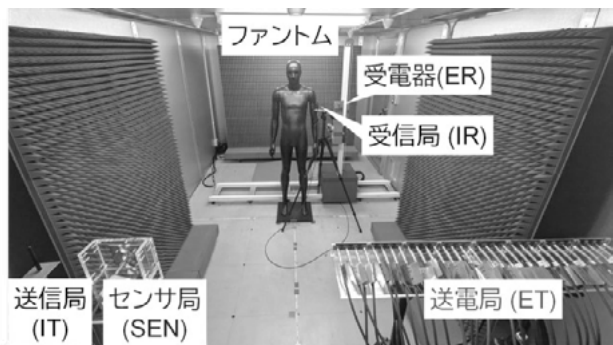


図 8 実験環境

表 1 実験条件

周波数	5.75 GHz
送電アンテナ (ET)	32素子半波長 リニアパッチアレー
センサ (SEN)	単素子パッチアンテナ
受電機 (ER)	クロスダイポールアンテナ
既存無線システム (IT/IR)	単素子ダイポールアンテナ
送受電間距離	2 m
測定領域 (x, y, z) m	$x = 2.0$ $-1.0 \leq y \leq 1.0$ $0.15 \leq z \leq 2.0$
総送信電力	32 W (45 dBm)

した。この等振幅制約により、問題は非凸最適化問題となるが、人体および IR の回避を目的とした最適化問題として定式化することができる。

2. 2 開発した無線電力伝送装置

本研究開発では、32 素子アレーによる無線電力伝送を実現するための送信装置を製作した。図 5～図 7 に、製作した装置の外観を示す。本装置は、

- ・ 600 MHz-6 GHz 32ch アップコンバータ
- ・ 5.75 GHz 32ch バンドパスフィルター
- ・ 5.75 GHz 32ch パワーアンプアレー

から構成されており、32 チャンネルの送信系を有する。

パワーアンプアレーは、各系統において最大増幅率 55.8 dB、最大 RF 出力電力 37 dBm を実現しており、32 系統動作時には最大 RF 出力 52 dBm に相当する送信電力が得られる。この出力は、総務省が示す 5.75 GHz 帯における空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの共用検討パラメータである空中線電力 45.0 dBm に到達可能な電力水準である。

また、本研究では、32 素子半波長間隔リニアパッチアレーアンテナを製作した。各アンテナ素子の空中線利得を 6 dBi と想定すると、アレー全体の利得は約 21 dBi となり、共用検討パラメータである空中線利得 25.0 dBi を満たしつつ、高出力パワーアンプと組み合わせることで、等価等方輻射電力 (EIRP: Equivalent Isotropically Radiated Power) 70 dBm に到達可能である。

図 8 は本装置の評価環境である。本装置は、高精度なビームフォーミング制御と高出力無線電力伝送を両立し、人体ばく露の回避および IR への干渉回避を実現するための実験プラットフォームとして、本研究における各種評価に用いた。ここで、表 1 は本装置の詳細な諸元である。

2. 3 無線電力伝送・無線通信実験

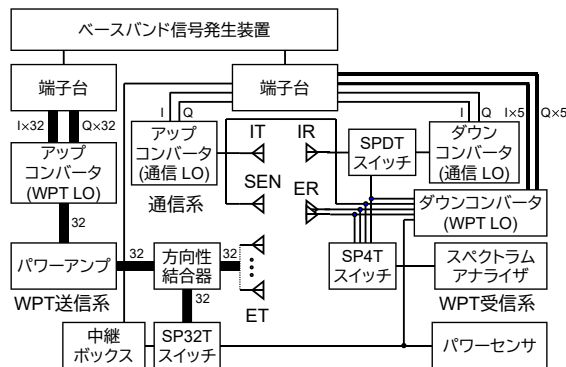


図 9 実験システム図

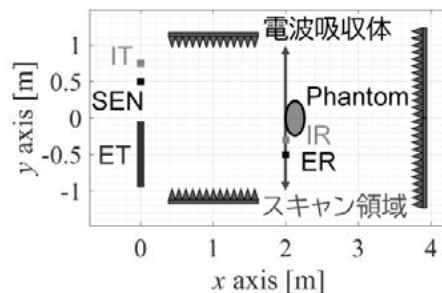


図 10 実験環境図



図 11 使用装置

本システムは、図 9 に示すように、ベースバンド信号発生装置を用いた WPT 送信系、WPT 受信系、および通信系から構成される。WPT 送信系は、ベースバンド信号をアップコンバータにより振幅および位相を制御した RF 信号へ変換し、パワーアンプで増幅したのち、32 素子半波長間隔リニアパッチアレーの ET から送信する。これにより、本システムではデジタルビームフォーミングが可能である。また、方向性結合器の結合ポートに接続されたパワーセンサおよびダウンコンバータを用いて送信信号の振幅および位相を観測し、ET アレーの素子間振幅・位相補正のための校正を行う。

WPT 受信系は、単素子パッチアンテナの SEN および垂直・水平偏波単素子クロスダイポールアンテナの ER で受信した WPT 信号を、ディバイダにより分岐し、SP4T スイッチで切り替える。受信信号は、スペクトラムアナライザにより受信電力を測定するとともに、ダウンコンバータによりベースバンド信号へ変換する。

通信系の送信側は、ベースバンド信号を OFDM 方式により変調し、各サブキャリアを 16QAM で変調した信号をアップコンバータにより RF 信号へ変換し、単素子ダイポールアンテナの IT (Information Transmitter) から送信する。

通信系の受信側では、IR で受信した信号を SPDT スイ

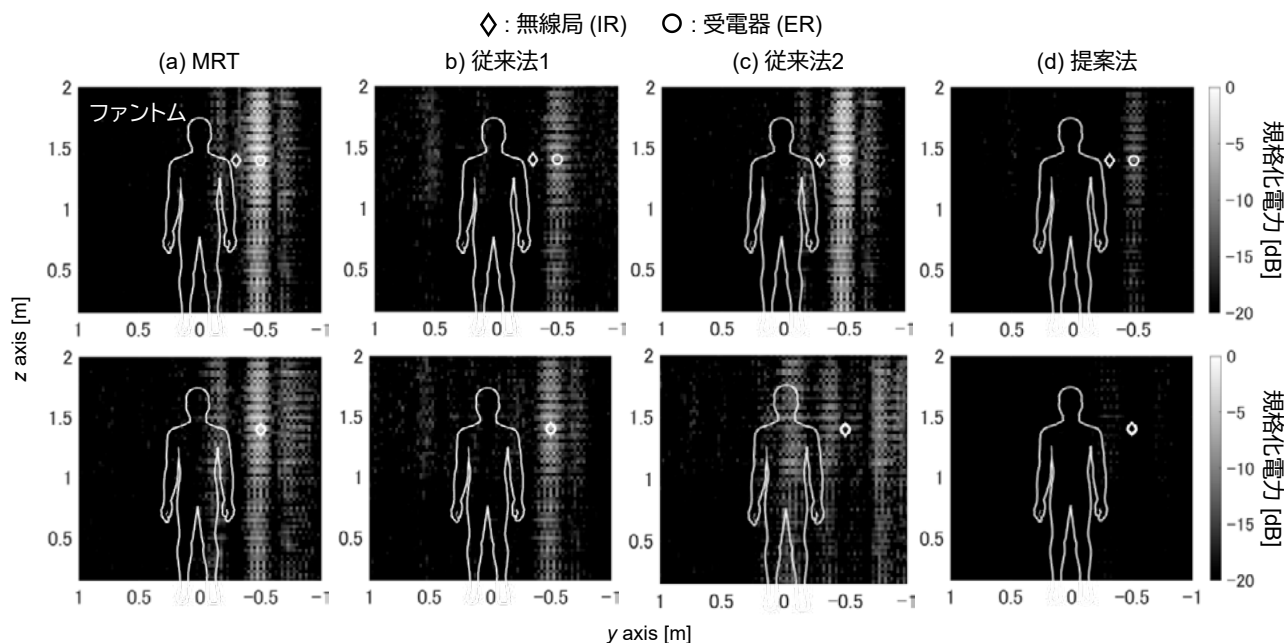


図 12 ER 電磁界マップ：上段は ER (2.0, -0.5, 1.4), IR (2.0, -0.3, 1.4) のとき、
下段は ER (2.0, -0.5, 1.4)、IR (2.0, -0.5, 1.4) のとき。

表 2 OFDM 物理層パラメータ

変調方式	OFDM
データサブキャリア変調	16QAM
FFTサイズ	256
使用サブキャリア数	201
ガードインターバル長	32 サンプル
プリアンプル	Short: BPSK (5シンボル) Long: QPSK (2シンボル)
信号帯域幅	1 MHz
サンプリングレート	2 MHz

ッチで切り替え、スペクトラムアナライザによる受信電力の測定、通信系および WPT 系それぞれの LO を用いたダウンコンバータによりベースバンド信号への変換を行う。

図 10 に実験環境を、図 11 に実験環境の外に置かれた実験装置の外観を示す。本環境では、人の代替として人体の形状や比誘電率、導電率を模倣したファントムを用いた。ET、ER、および IT、IR は同一空間内に配置し、ファントムを介した無線電力伝送および無線通信の評価を行った。また、本実験系では、ET に受信機能を具備しないため、2.1 で述べた ER チャンネルの取得法を適用できない。そのため、ER の受信信号を観測可能とし、IR チャンネルの取得法と同様に推定した。

表 1 の実験条件に示通り、本実験では、無線電力伝送と無線通信を同一および隣接周波数帯において同時に実施した。周波数は 5.75 GHz とした。チャンネル推定および無線電力伝送・無線通信では、ET に 32 素子半波長間隔リニアパッチアレー、SEN に単素子パッチアンテナ、ER に垂直・水平偏波単素子クロスダイポールアンテナを用いた。各アンテナは三脚およびポジショナにより全て高さ 1.40 m に設定した。チャンネル推定時には、ET の各アンテナ素子から 30 dBm の信号を送信した。一方、無線電力伝送時には、ET アレー全体の総送信電力を 32 W とした。実験では、提案法で定式化した等振幅制約付きの非凸最適化問題に対し、数値的にビームフォーミングウェイトを算出し

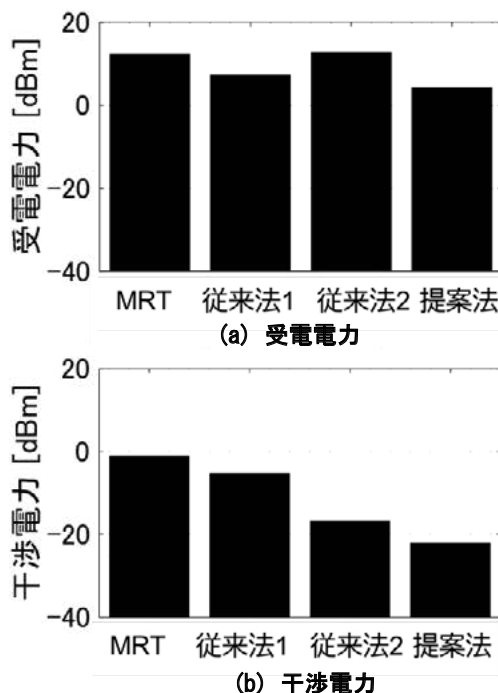


図 13 ER(2.0, -0.5, 1.4), IR (2.0, -0.3, 1.4) における
各手法による電力比較

た。本研究では、その一例として CVX を用いて解を求めた。

無線通信では、Wi-Fi の W56 帯に則り、周波数を 5500 MHz から 5740 MHz まで 20 MHz 間隔で変化させた場合と、無線電力伝送と同一の 5750 MHz とした場合について評価を行った。送受信間距離は 2 m、通信送信電力は 1 mW とした。通信方式には OFDM を使い、サブキャリアの変調方式として 16QAM を採用した。信号帯域幅は 1 MHz とし、送信および受信のベースバンド信号のサンプリングレートはいずれも 2 MHz とした。その他の OFDM 物理層パラメータは表に示す。

領域走査測定では、ET、SEN、IT は同様の配置とし、

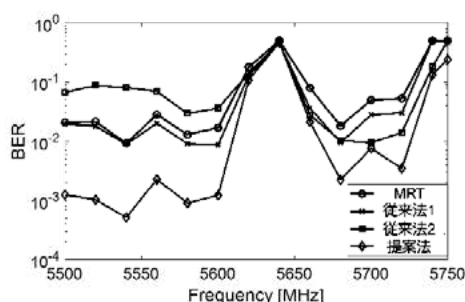


図 14 ER(2.0, -0.5, 1.4)、IR (2.0, -0.7, 1.4) における BER の比較

ER のみをポジショナを用いて、幅 2 m、高さ 2 m の領域を 0.025 m 間隔で走査しチャンネルおよび受電電力を測定した。

本実験では、以下の 2 つの項目について評価した。

- ・電磁界分布: BF を行ったときの領域内での ER の受電電力を評価する。

- ・無線電力伝送時の受電電力、干渉電力、BER 評価: BF を行ったときの ER の受電電力、IR の干渉電力、IT-IR 間通信における BER を測定する。

各評価では、(a) 人体と IR を考慮せずに受電電力を最大化する Maximum Ratio Transmission (MRT)、(b) 受電電力対人体ばく露電力を最大化する従来法 1、(c) 無線局のみを回避しつつ、受電電力を最大化する従来法 2、(d) 提案法の 4 通りのアルゴリズムを評価する。

図 12 に電磁界分布を示す。ここで、電磁界は MRT の最大値で規格化している。それぞれの図中の白枠線が人体ファントム領域を、菱形が ER、円形が IR を表している。

図 12 上段は、ER を $(x, y, z) = (2, -0.3, 1.4)$ 、IR を $(x, y, z) = (2, -0.5, 1.4)$ に配置し、さらにファントムを $(x, y) = (2, 0)$ に設置した場合の電磁界分布を示している。本条件において、各手法により形成されるビームパターンの特徴を以下に述べる。まず、MRT では、ER に対して高効率な給電が実現されている一方で、ファントム領域および IR 方向にサイドローブが照射されており、人体ばく露および既存無線局への干渉が生じる可能性が確認された。従来法 1 では、ファントムを回避しつつ ER への給電効率を維持できているが、わずかに IR 方向への干渉成分が残存していることが分かる。従来法 2 では、IR を回避しつつ ER に対して高効率な給電が可能であるものの、ファントム方向にサイドローブが照射されており、人体ばく露の観点で改善の余地がある。これに対し、提案法では、ファントムおよび IR の双方を効果的に回避しつつ、ER に対して主ローブを適切に形成できていることが確認できる。

次に、図 12 下段に、ER および IR を同一箇所である $(x, y, z) = (2, -0.5, 1.4)$ に配置し、さらにファントムを $(x, y) = (2, 0)$ に設置した場合の電磁界分布を示す。本条件における各手法のビーム形成特性を以下に述べる。MRT では、先の結果と同様に ER に対して高効率な給電が実現されているものの、IR 方向にメインローブが形成され、さらにファントム領域にサイドローブが照射されている。そのため、人体ばく露および既存無線局への干渉が生じる可能性が確認された。従来法 1 では、ファントムを回避しつつ ER への給電効率を維持できているが、IR 方向にメインローブが照射されており、干渉抑圧の観点で課題が残る。

従来法 2 では、ER への給電よりも IR の回避を優先しているため、IR 方向への干渉は抑圧されているものの、

ファントム領域にサイドローブが照射されており、人体ばく露の観点で改善の余地がある。これに対し、提案法では、ER への給電より、IR への干渉回避を優先し、さらに人体領域の回避も同時に達成していることが確認できる。

続いて、無線電力伝送時の受電電力と干渉電力を示す。

まず、ER を $(x, y, z) = (2, -0.3, 1.4)$ 、IR を $(x, y, z) = (2, -0.5, 1.4)$ 、ファントムを $(x, y) = (2, 0)$ を配置したとき、図 13 より MRT では、ER への高効率給電が可能であるが干渉が発生する。従来法 1 では、ER へ高効率に給電しているが、干渉を回避できていない。これらに対して従来法 2 と、提案法では、給電と干渉回避を両立できている。さらに、提案法は、従来法 2 に比べ、IR で低い電磁界となった。これは、IR への干渉回避を保証する原理の有効性を示している。

最後に、無線電力伝送時の BER を示す。ER を $(x, y, z) = (2, -0.3, 1.4)$ 、IR を $(x, y, z) = (2, -0.5, 1.4)$ 、ファントムを $(x, y) = (2, 0)$ を配置したとき、図 14 より提案法は、5500MHz から 5600MHz までの帯域でほか手法と比較して、最低でも 1/10 の BER を達成している。また、今回測定した全帯域において、常に最も低い BER を達成していることから、提案法の高い干渉回避性能が確認できた。

3. 今後の研究成果の展開

本研究で提案したビームフォーミング方式は、MWPT の社会実装における最大の障壁である人体への安全性と既存無線システムとの共用性を、高度な信号処理によって解決可能であることを示した。今後は、本成果を実環境での運用フェーズへと進めるため、以下の三点を軸に展開する。

- ・電波防護指針値および許容干渉電力の厳密な遵守 (法的適合性の確保) : 現状の最適化アルゴリズムをさらに発展させ、総務省が定める電波防護指針値 (SAR や電力束密度) および他システムへの許容干渉電力を「絶対的な制約条件」として組み込んだ制約付き最適化手法を確立する。これにより、理論的な比率最大化に留まらず、電波法に基づく技術基準適合証明等の取得を視野に入れた、実運用に耐える安全設計を実現する。

- ・動的環境下におけるリアルタイム・ロバスト性の向上 : 受電器や人体、既存無線局 (IR) の移動に伴うチャンネル変動に対し、高速かつ高精度に追従するリアルタイム制御技術と連携により、不意の遮蔽や位置変化が生じた際にも瞬時にマルチステアリングを維持し、回避対象への電力照射を確実に遮断するロバスト性を担保する。

- ・実社会への導入に向けた実証と標準化への貢献 : 今後は、オフィスや工場、スマートシティ等の具体的なユースケースを想定したプロトタイプ開発を進める。また、本研究で得られた「干渉抑圧と給電効率の両立」に関する知見を、WPT に関する国内の技術基準検討会 (総務省 情報通信審議会等) や国際標準化 (ITU-R 等) の議論へのフィードバックも検討に入れ、MWPT の早期実用化と新たな電波利用産業の創出に貢献する。

4. むすび

本研究開発では、マイクロ波無線電力伝送の実用化に向けて、人体および他無線システムへの電力照射の回避と給電高効率化の両立という課題に取り組んだ。特に、一般環境に適用可能なビームフォーミング法について提案し、実伝送実験による有効性評価を行った。回避対象である人体・他無線局と、給電対象である受電器のチャンネルを受動

的に推定し、無線局に対しマルチステアリングをしつつ人体ばく露電力と受電電力の比を最大化することで、人体・無線局回避と高効率給電の両立する実ビームフォーミングを可能とした。

実験結果から、提案法は、実伝送において無線局が給電対象の近傍にある状況においても高効率給電および人体・無線局回避を両立しており、実際の通信でも干渉回避によるBERの改善が確認できた。

今後、人体・無線局・受電器の位置が変位しても、総務省が定める電波防護指針および許容干渉電力を遵守した高効率給電が可能となるよう、位置変位に対する高ロバスト化に取り組む。

参考文献

- [1] N. Shinohara, “Beam control technologies with a high-efficiency phased array for microwave power transmission in Japan,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1448–1463, Jun. 2013.
- [2] N. Shinohara, “History and innovation of wireless power transfer via microwaves,” *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 1, no. 1, pp. 218–228, Jan. 2021.
- [3] N. Shinohara, “Trends in wireless power transfer: WPT technology for energy harvesting, millimeter-wave/THz rectennas, MIMO-WPT, and advances in near-field WPT applications,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 22, no. 1, pp. 46–59, Jan. 2021.
- [4] V. Palazzi, F. Matri, A. Costanzo, and D. Masotti, “Radiative wireless power transfer: Where we are and where we want to go,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 24, no. 2, pp. 57–79, Feb. 2023.
- [5] 総務省 情報通信局, 「周波数再編アクションプラン」, 2022 年.
- [6] T. Saito, “Present and future action regarding conformity certification system based on radio law,” Proc. MIC Mutual Recognition Agreement (MRA) International Workshop, 2023.
- [7] IEEE, “IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz,” IEEE Std C95.1-2005, 2006.
- [8] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), “Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz),” *Health Physics*, vol. 118, no. 5, pp. 483–524, May 2020.
- [9] Federal Communications Commission (FCC), “Evaluating Compliance With FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields,” OET Bulletin 65, 1997.
- [10] 総務省 情報通信局, 「電波防護指針」, 2018 年.
- [11] A. Christ, M. Douglas, J. Nadakuduti, and N. Kuster, “Assessing human exposure to electromagnetic fields from wireless power transmission systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1482–1493, Jun. 2013.
- [12] R. A. Bercich, D. R. Duffy, and P. P. Irazoqui, “Far-field RF powering of implantable devices: Safety considerations,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 60, no. 8, pp. 2107–2112, Aug. 2013.
- [13] B. Clerckx, R. Zhang, R. Schober, D. W. K. Ng, D. I. Kim, and H. V. Poor, “Fundamentals of wireless information and power transfer: From RF energy harvester models to signal and system designs,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 1, pp. 4–33, Jan. 2019.
- [14] K. W. Choi *et al.*, “Distributed wireless power transfer system for Internet of Things devices,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 2657–2671, Aug. 2018.
- [15] S. Shen, J. Kim, C. Song, and B. Clerckx, “Wireless power transfer with distributed antennas: System design, prototype, and experiments,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 11, pp. 10868–10878, Nov. 2021.
- [16] Y. Tanaka *et al.*, “Simulation and implementation of distributed microwave wireless power transfer system,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 71, no. 1, pp. 102–111, Jan. 2023.
- [17] H. Dai *et al.*, “Safe charging for wireless power transfer,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 25, no. 6, pp. 3531–3544, Dec. 2017.
- [18] H. Dai *et al.*, “SCAPE: Safe charging with adjustable power,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 26, no. 1, pp. 520–533, Feb. 2018.
- [19] H. Dai *et al.*, “Radiation constrained scheduling of wireless charging tasks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 26, no. 1, pp. 314–327, Feb. 2018.
- [20] H. Dai *et al.*, “Radiation constrained wireless charger placement,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 29, no. 1, pp. 48–64, Feb. 2021.
- [21] L. Li *et al.*, “Radiation constrained fair charging for wireless power transfer,” *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 15, no. 2, pp. 1–33, Feb. 2019.
- [22] H. Dai *et al.*, “ROSE: Robustly safe charging for wireless power transfer,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 21, no. 6, pp. 2180–2197, Jun. 2022.
- [23] K. Murata *et al.*, “A 5.8-GHz 64-channel phased array microwave power transmission system based on space-time beamforming algorithm for multiple IoT sensors,” Proc. *European Microwave Conference (EuMC)*, pp. 170–173, Sep. 2018.
- [24] G. Pabbisetty *et al.*, “Estimation of required transmit power to realize zero-maintenance sensor systems with WPT,” Proc. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2019.
- [25] G. Pabbisetty *et al.*, “Evaluation of space-time beamforming algorithm for MWPT in 5.7-GHz band,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 12, pp. 5228–5234, Dec. 2019.
- [26] K. Arai *et al.*, “Tile-based 8×8 triangular grid array beamformer for 5.7-GHz MWPT,” Proc. *IEEE Radio and Wireless Symposium*, 2021.
- [27] J. H. Park *et al.*, “Design and implementation of 5.8-GHz RF wireless power transfer system,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 168520–168534, 2021.
- [28] N. Hasegawa and Y. Ohta, “Two-dimensional simple beam steering for large-scale antennas on MWPT,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and*

Techniques, vol. 70, no. 4, pp. 2432–2441, Apr. 2022.

[29] J. Zhang, G. Zheng, I. Krikidis, and R. Zhang, “Specific absorption rate-aware beamforming in MISO downlink simultaneous wireless information and power transfer systems,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 2, pp. 1312–1326, Feb. 2020.

[30] J. Zhang, G. Zheng, I. Krikidis, and R. Zhang, “Fast specific absorption rate-aware beamforming for downlink SWIPT via deep learning,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 12, pp. 16178–16182, Dec. 2020.

[31] C. Psomas, M. You, K. Liang, G. Zheng, and I. Krikidis, “Design and analysis of simultaneous wireless information and power transfer systems with safety constraints,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 110, no. 1, pp. 107–126, Jan. 2022.

[32] H. Y. Kim and S. Nam, “Optimization of MWPT with specific absorption rate constraint,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 11, pp. 7721–7726, Nov. 2020.

[33] O. L. A. López *et al.*, “Massive MIMO with radio stripes for indoor wireless energy transfer,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 9, pp. 7088–7104, Sep. 2022.

[34] L. Ginting *et al.*, “Beam avoidance for human safety in radiative wireless power transfer,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 217510–217525, 2020.

[35] C. van Rensburg and B. Friedlander, “Performance of null-steering beamformers in correlated Rayleigh fading,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 11, pp. 3117–3125, Nov. 2004.

[36] J. Peña-Martin *et al.*, “Performance comparison of MRC and IC under transmit diversity,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 5, pp. 2484–2493, May 2009.

[37] X. Zhang *et al.*, “Robust sidelobe control via complex-coefficient weight vector decomposition,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 8, pp. 5411–5425, Aug. 2019.

[38] K. Murata, N. Kaneko, K. Muramatsu, H. Yamamoto, and N. Honma, “Human-aware energy beamforming for microwave wireless power transfer,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2025.

[39] A. D. Droitcour, O. Boric-Lubecke, V. M. Lubecke, J. Lin, and G. T. A. Kovacs, “Range correlation and I/Q performance benefits in single-chip silicon Doppler radars for noncontact cardiopulmonary monitoring,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 3, pp. 838–848, Mar. 2004.

[40] B.-K. Park, O. Boric-Lubecke, and V. M. Lubecke, “Arc tangent demodulation with DC offset compensation in quadrature Doppler radar receiver systems,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, no. 5, pp. 1073–1079, May 2007.

[41] A. D. Droitcour, O. Boric-Lubecke, and G. T. A. Kovacs, “Signal-to-noise ratio in Doppler radar systems for heart and respiratory rate measurements,”

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 57, no. 10, pp. 2498–2507, Oct. 2009.

[42] A. Singh, R. Gao, J.-C. Chiao, and V. M. Lubecke, “Data-based quadrature imbalance compensation for a CW Doppler radar system,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 4, pp. 1718–1724, Apr. 2013.

[43] M. Zakrzewski, A. D. Droitcour, and O. Boric-Lubecke, “Quadrature imbalance compensation with ellipse-fitting methods for microwave radar physiological sensing,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 6, pp. 1400–1408, Jun. 2014.

[44] I. Mostafanezhad and O. Boric-Lubecke, “Benefits of coherent low-IF for vital signs monitoring using Doppler radar,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 10, pp. 2481–2487, Oct. 2014.

[45] E. Yavari and O. Boric-Lubecke, “Channel imbalance effects and compensation for Doppler radar physiological measurements,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 11, pp. 3834–3842, Nov. 2015.

【査読付き誌上発表論文】

[1] 村田健太郎, 村上靖宜, 久世竜司, “アンテナ・伝搬研究者の角度から見るメタサーフェスとその向かう先,” 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, vol. 70 秋号, pp. 172-189 (2024 年 9 月)

[2] Kentaro Murata, Naoki Kaneko, Kyoshiro Muramatsu, Haruki Yamamoto and Naoki Honma, “Human-Aware Energy Beamforming for Microwave Wireless Power Transfer,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 74, no. 1, pp. 1135 - 1153 (2026 年 1 月)

【その他の誌上発表】

該当なし

【査読付き口頭発表論文】

[1] Kentaro Murata, Haruki Yamamoto, Kyoshiro Muramatsu, Naoki Honma, “Safe Beamforming Based on Human Area Estimation for Microwave Wireless Power Transfer,” 18th European Conference on Antennas and Propagation, CS36b, pp.912-916 (2024 年 3 月 19 日)

[2] Naoki Honma, Kyoshiro Muramatsu, Haruki Yamamoto, Kentaro Murata, “High-Efficiency Microwave Wireless Power Transfer Realizing Simultaneous Avoidance of Existing System Interference and Human-Body Illumination,” The 2024 Asian Workshop on Antennas and Propagation, Invited session 5-1 (2024 年 6 月 27 日)

[3] Shunto Arai, Kentaro Murata, Naoki Honma, “Multi-Rectenna Separate Passive Channel Estimation Based on Independent Component Analysis for Microwave Wireless Power Transfer,” 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and ITNC-USNC-URSI Radio Science Meeting, WE-UC.1P.7 (2024 年 7 月 17 日)

[4] Kentaro Murata, Haruki Yamamoto, Naoki Honma, “Experimental Demonstration of Safe Beamforming Integrated with Wireless Human Sensing for Microwave Wireless Power Transfer,” 19th European Conference on Antennas and Propagation (2025 年 3

月 31 日)

- [5]Mao Sekine, Shunto Arai, Kentaro Murata, Naoki Honma, "Interference-Free Human-Aware Beamforming for Microwave Wireless Power Transfer," 2025 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2025), pp. 527-528 (2025 年 10 月 29 日)

【口頭発表】

- [1]村田健太郎, 本間尚樹, "マイクロ波無線電力伝送に向けた人体回避ビームフォーミングの実験的評価," 電気関係学会東北支部連合大会, 1G15 (2023 年 9 月 5 日)
- [2]本間尚樹, 村田健太郎, 村松亨朗, "人体回避と高効率給電を両立するマイクロ波電力伝送方式," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS-1-3 (2023 年 9 月 13 日)
- [3]山本晴喜, 村松亨朗, 村田健太郎, 本間尚樹, "人体回避 WPT ビームフォーミング法に向けた人体領域推定法," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-119 (2023 年 9 月 13 日)
- [4]新井駿斗, 村田健太郎, 本間尚樹, "マイクロ波無線電力伝送における独立成分分析に基づく複数レクテナの受動伝搬路推定法," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-113 (2023 年 9 月 13 日)
- [5]新井駿斗, 村田健太郎, 本間尚樹, "マイクロ波電力伝送における独立成分分析に基づく複数レクテナの分離的受動チャンネル推定法," 信学技報, AP2023-79, pp. 4-9 (2023 年 9 月 28 日)
- [6]瀬川智尋, 村田健太郎, 本間尚樹, "Reconfigurable Intelligent Surface を用いた電子ファントム ~MIMO のレーダ受信信号再構成アルゴリズムに関する検討~, " 信学技報, AP2023-181, pp. 110-115 (2024 年 1 月 19 日)
- [7]山本晴喜, 村松亨朗, 村田健太郎, 本間尚樹, "バイスタティック MIMO レーダを用いた人体向き推定法に関する基礎検討," 信学技報, AP2023-182, pp. 116-121 (2024 年 1 月 19 日)
- [8]本間尚樹, 村松亨朗, 村田健太郎, "他システムと干渉と人体照射を同時回避する高効率マイクロ波電力伝送," 電子情報通信学会総合大会, B-1C-05 (2024 年 3 月 6 日)
- [9]村田健太郎, 瀬川智尋, 新井駿斗, 小澤勇人, 佐藤あゆみ, 本間尚樹, 宮島信也, "Reconfigurable Intelligent Surface を用いた電子ファントム," 電子情報通信学会総合大会, BS-1-02 (2024 年 3 月 7 日)
- [10]佐藤あゆみ, 新井駿斗, 滝島正博, 瀬川智尋, 村田健太郎, 本間尚樹, 宮島信也, "Reconfigurable Intelligent Surface を用いた電子ファントムのハードウェア構成に対する MIMO レーダチャンネル再構成精度の評価," 電子情報通信学会総合大会, B-1C-43 (2024 年 3 月 8 日)
- [11]瀬川智尋, 村田健太郎, 本間尚樹, "Reconfigurable Intelligent Surface を用いた電子ファントム ~ 振幅・位相独立制御型可変負荷回路を用いた MIMO レーダチャンネル再構成に関する検討 ~," 信学技報, AP2023-211, pp. 57-62 (2024 年 3 月 15 日)
- [12]本間尚樹, 村松亨朗, 山本晴喜, 村田健太郎, "他システムと干渉と人体照射を同時回避する高効率マイクロ波電力伝送の実験的評価," 信学技報, AP2024-14, pp. 37-42 (2024 年 5 月 17 日)
- [13]村田健太郎, 滝島正博, 瀬川智尋, 本間尚樹, 伊東良太, "広帯域レーダ信号に対応した電子ファントムに関する基礎検討," 電気関係学会東北支部連合大会, 2A01-05-02 (2024 年 8 月 30 日)
- [14]山本晴喜, 村田健太郎, 本間尚樹, "人体領域推定に基づく WPT ビームフォーミング法による電力密度分布の実験的評価," 電気関係学会東北支部連合大会, 2A01-

05-03 (2024 年 8 月 30 日)

- [15]村田健太郎, 小澤勇人, 瀬川智尋, 佐藤あゆみ, 本間尚樹, 宮島信也, "再構成可能な電子ファントムの実現に向けた研究開発," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS-2-02 (2024 年 9 月 11 日)
- [16]村田健太郎, 瀬川智尋, 小澤勇人, 佐藤あゆみ, 本間尚樹, 宮島信也, "[依頼講演] RIS に着想を得た再構成可能な電子ファントム," 信学技報, AP2024-175, pp. 45-50 (2025 年 1 月 23 日)
- [17]村田健太郎, 瀬川智尋, 小澤勇人, 本間尚樹, 宮島信也, "電子ファントムにおけるアレー素子不整合を考慮したチャンネル再構成法," 電子情報通信学会総合大会, B-1C-17 (2025 年 3 月 26 日)
- [18]新井駿斗, 村田健太郎, 本間尚樹, "マイクロ波無線電力伝送用フェーズドアレーに実装可能な複数レクテナの受動チャンネル推定法," 電子情報通信学会総合大会, B-1C-29 (2025 年 3 月 26 日)
- [19]関根真旺, 山本晴喜, 新井駿斗, 村田健太郎, 本間尚樹, "既存無線システムへの与干渉回避を保証する人体回避 WPT ビームフォーミング法の実験的評価," 電子情報通信学会総合大会, BS-1-02 (2025 年 3 月 27 日)
- [20]新井駿斗, 村田健太郎, 本間尚樹, "マイクロ波無線電力伝送における複数レクテナの受動チャンネル推定法の実験的評価," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1C-16 (2025 年 9 月 10 日)
- [21]村田健太郎, "[ポスター講演] 生体を電磁的に模倣するインテリジェントファントム ~ 低コスト・高再現性のヒトセンシングレーダ OTA 試験を実現する新たなベンチマークプラットフォーム ~," 信学技報, MIKA2025 (2025 年 9 月 29 日)
- [22]村田健太郎, 本間尚樹, "[依頼講演] マイクロ波無線電力伝送のジレンマ," 信学技報, WPT2025-31, pp. 18-23, (2025 年 12 月 12 日)
- [23]村田健太郎, 関根真旺, 新井駿斗, 本間尚樹, "[依頼講演] 電波防護指針に準拠した無線センシング・無線電力伝送統合型ビームフォーミング技術の実験的評価," 信学技報, AP2025-203, pp. 128-133 (2026 年 1 月 23 日)
- [24]新井駿斗, 村田健太郎, 本間尚樹, "マイクロ波無線電力伝送における受動エクспリシットチャンネル推定法," 電子情報通信学会総合大会, B-1C-26 (2026 年 3 月 12 日)
- [25]村田健太郎, 本間尚樹, "[チュートリアル講演] 生体模倣インテリジェント電磁ファントムの研究開発 ~ ヒトセンシングレーダの新たな標準化 OTA 試験基盤の実現に向けて ~," 信学技報, AP2025-229, pp. 30-35 (2026 年 3 月 18 日)

【誌上発表リスト】

該当なし

【申請特許リスト】

該当なし

【登録特許リスト】

該当なし

【受賞リスト】

- [1]村田健太郎, 電気学会東北支部 優秀論文発表賞 B 賞, "マイクロ波無線電力伝送に向けた人体回避ビームフォーミングの実験的評価" (2024 年 4 月 8 日)
- [2]山本晴喜, 村松亨朗, 村田健太郎, 本間尚樹, アンテナ・伝播研究専門委員会 学生奨励賞, "人体幅推定に基づく人体回避ビームフォーミング法/バイスタティック MIMO レーダを用いた人体幅推定に基づく人体向き推定の基礎検討" (2024 年 6 月 13 日)

- [3]瀬川智尋, 村田健太郎, 本間尚樹, アンテナ・伝播研究専門委員会 学生奨励賞, "Reconfigurable Intelligent Surface を用いた電子ファントム ~MIMO レーダの受信信号再構成アルゴリズムに関する検討~"/Reconfigurable Intelligent Surfaceを用いた電子ファントム ~振幅・位相独立制御型可変負荷回路を用いたMIMO レーダチャネル再構成に関する検討~" (2024 年 6 月 13 日)
- [4]村田健太郎, 第 20 回電子情報通信学会 通信ソサイエティ論文賞 (マガジン賞), "アンテナ・伝播研究者の角度から見るメタサーフェスとその向かう先" (2025 年 5 月 16 日)
- [5]村田健太郎, 革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA2025) ポスター賞 (シニア部門), "[ポスター講演] 生体を電磁的に模倣するインテリジェントファントム ~ 低コスト・高再現性のヒトセンシングレーダ OTA 試験を実現する新たなベンチマークプラットフォーム ~" (2025 年 9 月 29 日)
- [6]村田健太郎, 革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA2025) スポンサー賞 (キーサイト賞), "[ポスター講演] 生体を電磁的に模倣するインテリジェントファントム ~ 低コスト・高再現性のヒトセンシングレーダ OTA 試験を実現する新たなベンチマークプラットフォーム ~" (2025 年 9 月 29 日)
- [7] Mao Sekine, Shunto Arai, Kentaro Murata and Naoki Honma, Best Paper Award, 2025 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2025), "Interference-Free Human-Aware Beamforming for Microwave Wireless Power Transfer," (2025 年 10 月 30 日)

【報道発表リスト】

該当なし

【国際標準提案リスト】

該当なし

【参加国際標準会議リスト】

該当なし