

結合共振型無線電力伝送用アレーアンテナを用いた金属異物検出システムの検討

矢満田博之[†] 平山 裕^{†a)} 菊間 信良[†] 榊原久二男[†]

A Consideration of Obstacle Detection Method Using Array Antenna
for Coupled Resonant Wireless Power Transfer

Hiroyuki YAMADA[†], Hiroshi HIRAYAMA^{†a)}, Nobuyoshi KIKUMA[†],
and Kunio SAKAKIBARA[†]

あらまし 結合共振型無線電力伝送において、送電アンテナと受電アンテナ間に異物が存在すると、伝送効率が低下するだけでなく、異物が加熱されて発煙や発火の可能性が懸念される。本論文では、無線電力伝送用アンテナとして、送受電ともにアレーアンテナを用いることにより、電力伝送に用いるアンテナを用いて異物の存在を検出する方法を提案している。異物検出のための指標として、チャンネル行列に基づく方法と、反射・伝送係数に基づく方法を検討する。電磁界シミュレーションにより、チャンネル行列を用いた方法では、アンテナ間隔が波長に比べて短いため検出が困難であるが、反射・伝送係数のばらつきを用いた方法では異物が検出できることを明らかにした。

キーワード 結合共振型無線電力伝送, アレーアンテナ, 異物検出, チャンネル行列, 標準偏差

1. ま え が き

近年、通信技術の発達により電子機器に接続される配線がワイヤレス化されてきており、電源供給もワイヤレス化することに対する期待が高まっている。また、電気自動車の普及が見込まれるため、電気自動車への無線充電への需要が高まっている。無線電力伝送の技術として、結合共振型無線電力伝送 [1] が、その伝送距離と伝送電力の観点から期待を集めている。しかしながら、電気自動車においては kW オーダーの電力伝送が必要となるため、送電アンテナと受電アンテナ間に金属異物が存在すると、渦電流による発熱により、発煙や発火の危険があることが懸念される。そのため、金属異物の検出手法が必要となる。また、応用するアプリケーションにより確保すべき安全性の範囲は異なり、例えば、電気自動車に应用する場合、発煙、発火の危険性が生じる異物を全て検出する必要がある。そ

のため、最小検知対象として熱容量が小さいガムやたばこの包み紙や、爆発の恐れがあるボタン電池等まで検知する必要がある。

結合共振型無線電力伝送において金属異物を検出するには、可視光線カメラにより画像認識を行う方法、加熱による金属異物の温度変化を検知する方法と、金属異物による電磁界の変化を検知する方法に大別される。画像認識による方法だと、電力伝送に影響を及ぼす金属と、それ以外の物体を識別できないという問題がある。加熱による金属異物の温度変化を検知する方法として、赤外線センサや温度センサを用いる方法があるが、金属が発熱してからでないとい検出できないという問題があり、確保できる安全に制限がある。このため、金属異物のみを事前に検出できる、電磁界の変化を検知する方法が有効であると考えられる。金属異物による電磁界の変化を検知する方法の一つとして、電力伝送用アンテナの共振周波数の変化を検知する方法が提案されている [2]。この方法は温度変化が起こる前に金属異物検知が可能であるが、電源に可変周波数発振器が必要であることが問題である。

近年、電力伝送範囲の拡大や位置ずれ耐性の強化を目的として、送電アンテナ・受電アンテナにアレーア

[†] 名古屋工業大学大学院情報工学専攻, 名古屋市
Department of Computer Science and Engineering, Nagoya
Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi,
466-8555 Japan

a) E-mail: hirayama_hiroshi@m.ieice.org

ンテナを用いる方法が提案されている [3]. 送電アンテナ・受電アンテナとして、それぞれ 4 素子のアンテナを用いた場合、給電の状態を監視するために 4 個の反射係数、及び 16 個の伝送係数を常時モニターする必要がある。これらの情報を利用することにより、追加のハードウェアなしで金属異物による電磁界の変化を検出する方法が考えられる。本論文では、電力伝送用アレーアンテナを用いて金属異物の検出を行う方法として、チャンネル行列による方法と反射・伝送係数のばらつきによる方法を提案する。電磁界シミュレーションにより提案法の有効性を確認したところ、チャンネル行列に基づく方法は、一種の MIMO センサ [4], [5] であるともなすことができるが、結合共振型無線電力伝送に用いられる数 100kHz~10MHz 帯においては、アンテナ間距離が波長に比べて非常に小さいため、検出が行えないことが明らかになった。一方、伝送・反射係数のばらつきを用いた方法では、受電アレーが横ずれ 10cm 以内、傾きが水平に対して 1 度以内、全ての送電素子上に異物がない場合において、金属異物を検出できることを明らかにした。

本論文の構成は以下のとおりである。2. で、電力伝送及び異物検出に用いるアンテナのシステムモデルを示す。3. で、異物検出方法を説明する。4. では、電磁界シミュレーションにより、4 個の提案法の優劣及び有用性を検証する。5. では、反射・伝送係数のばらつきによる方法について、金属異物の位置特性、受電アレーの位置ずれ特性、受電アレーの傾き特性、複数異物侵入時の特性の検討をする。6. はまとめである。

2. システムモデル

システムモデルを図 1 に示す。送電アンテナ及び受電アンテナは 2×2 素子のアレーアンテナである [3]. $z = 0$ 平面上の 4 個の送電アンテナはそれぞれポート

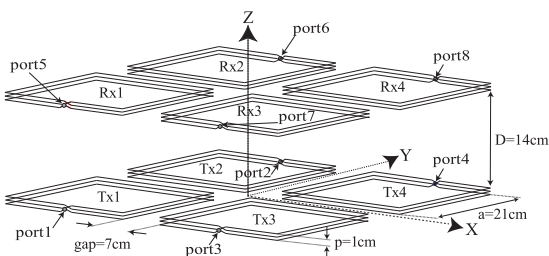


図 1 システムモデル
Fig. 1 System model.

1~4 をもつ。 $z = D$ 平面上の 4 個の受電アンテナはそれぞれポート 5~8 をもつ。各素子は 3 ターンの正方形ループアンテナであり、1 辺 21cm, ピッチ 1cm, 導線半径 1mm の寸法とし、導線には $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ の銅を用いた。このアンテナ素子を 7cm の間隔において並べる。送受電アンテナの各ポートには、共振用キャパシタ 22.3pF を直列に接続した。なお共振用キャパシタは、素子単体で設計周波数 13.56MHz において共振する容量である。

このアンテナを用いて電力伝送を行う場合、送電側では高周波電源の出力を電力分配器を用いて 4 個の送電アンテナに分配する。受電側では、4 個の受電アンテナの出力を電力合成器を用いて合成する。

実際に電力伝送を行う場合は、常に反射・伝送電力をモニターしながら行うため、反射係数 $S_{jj} (j = 1, \dots, 4)$ 及び伝送係数 $S_{ij} (i = 5, \dots, 8, j = 1, \dots, 4)$ が得られることとなる。

3. 金属異物検知のための評価方法

3.1 チャンネル行列に基づく方法

3.1.1 EDOF を用いる方法

送電側のポートと受電側のポートの間を MIMO チャンネルとみなすと、チャンネル行列 \mathbf{H} を以下のように定義できる。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} \\ S_{71} & S_{72} & S_{73} & S_{74} \\ S_{81} & S_{82} & S_{83} & S_{84} \end{bmatrix} \quad (1)$$

金属異物が存在した場合、金属異物による反射・散乱・回折によりマルチパス環境が変化する。マルチパス環境を評価する指標の一つとして、EDO (effective degree of freedom) [6] がある。EDO は次式で表される。

$$EDO = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\max \lambda_i} \quad (2)$$

ただし

$$\mathbf{H} = \mathbf{E}_r \mathbf{D} \mathbf{E}_t^H \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_t = [\mathbf{e}_t^1, \dots, \mathbf{e}_t^N] \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_r = [\mathbf{e}_r^1, \dots, \mathbf{e}_r^N] \quad (5)$$

$$\mathbf{D} = \text{diag}(\sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_N}) \quad (6)$$

ここで λ_i は固有値、 N はアンテナ数である。EDOF は等価的な固有伝搬路の数を示し、最小値は 1、最大値は N である。金属異物が存在しない場合の EDOF の値をあらかじめ求めておき、その値から変化のあった場合に、異物の存在を検出するものとする。

3.1.2 条件数を用いる方法

マルチパス環境を評価するもう一つの指標として、条件数がある。条件数 CN は次式で表される。

$$CN = \frac{\max \lambda_i}{\min \lambda_i} \quad (7)$$

EDOF が全固有値に対する最大固有値の比であるのに対し、条件数は最小固有値と最大固有値の比となっているところが特徴である。EDOF は全固有値を用いているのに対し、条件数は最大固有値と最小固有値のみを用いるため、EDOF とは異なる傾向を示すことが予想される。金属異物が存在しない場合の条件数をあらかじめ求めておき、その値から変化のあった場合に、異物の存在を検出するものとする。

3.2 S パラメータのばらつきに基づく方法

金属異物が存在しない場合、アンテナの配置には対称性があるため、4 個の送電アンテナにおける反射係数、及び 4 対の向かい合うアンテナ間の伝送係数は等しい値となる。金属異物が存在する場合、電磁界が乱されるため、これらの値に違いが出てくる。そこで、反射・伝送係数のばらつきにより金属異物の存在を検出する方法が考えられる。ばらつきの評価指標として、反射係数の標準偏差 σ_r 及び伝送係数の標準偏差 σ_t を用いる。

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|S_{i,i}| - |\overline{S_r}|)^2} \quad (8)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|S_{i+N,i}| - |\overline{S_t}|)^2} \quad (9)$$

ここで、 N はアレーの素子数、 $S_{i,j}$ はポート i と j の間の S パラメータ、 $|\overline{S_r}|$ は $|S_{11}|, |S_{22}|, |S_{33}|, |S_{44}|$ の平均値、 $|\overline{S_t}|$ は $|S_{51}|, |S_{62}|, |S_{73}|, |S_{84}|$ の平均値である。金属異物が存在しない場合の σ_t, σ_r をあらかじめ求めておき、その値から変化のあった場合に、異物の存在を検出するものとする。

4. シミュレーションによる四つの検出方法の評価

4.1 伝送距離特性

4.1.1 シミュレーション方法

提案法の有効性を検証するために、シミュレーションを行った。シミュレーションモデルを図 2 に示す。この節におけるシミュレーションでは、金属異物モデルとして、図 3 に示す空き缶サイズ (モデル 1) を用いた。この異物は中空であり、アルミニウムでできている。異物を送電側第一素子の上方に寝かせた状態で置き、送受電アンテナ間距離 D を 6cm から 20cm まで動かしたときの S パラメータをモーメント法により計算した。

4.1.2 チャネル行列に基づく方法

図 4 に、異物が存在するときと存在しないときの EDOF を示す。異物の有無により EDOF が変化していることが分かるが、異物の有無による変化は、伝送距離による変化に比べて小さい。そのため、EDOF をモニタリングするだけでは値の変化が金属異物によるものなのか、伝送距離の変化によるものなのかを区別することができないことがわかる。

図 5 に、異物が存在するときと存在しないときの条件数を示す。EDOF の場合と同様、異物の有無による変化はあるものの、伝送距離の変化に比べて小さい

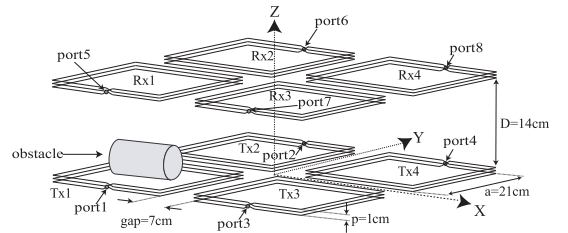


図 2 シミュレーションモデル
Fig. 2 Simulation model.



モデル 1 空き缶サイズ	 $h=12.22\text{cm}$ $r=3.3\text{cm}$
モデル 2 コインサイズ	 $h=0.181\text{cm}$ $r=1.33\text{cm}$

図 3 異物モデルサイズ
Fig. 3 Size of obstacle model.

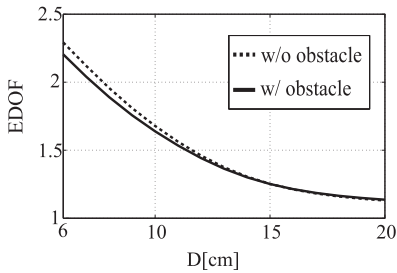


図 4 EDOF の伝送距離特性

Fig. 4 Effect of distance between Tx and Rx on EDOF.

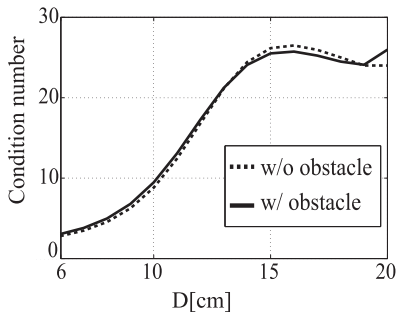


図 5 条件数の伝送距離特性

Fig. 5 Effect of distance between Tx and Rx on condition number.

め、異物検出のための評価指標としては適さないことがわかる。

EDOF 及び条件数による評価法が金属異物の検出の指標として適さない理由として、アンテナサイズやアンテナ間距離が波長に対して小さいことが挙げられる。共振周波数である 13.56MHz において、アレーアンテナの素子間距離は 0.003λ 、送受電アンテナ間距離は 0.009λ である。EDOF は、素子間距離が半波長であれば、周囲の金属物体の有無に対して十分大きな変動を示すが [7]、今回のように互に向かい合うコイルとの結合が支配的であり、隣のコイルとの結合が相対的に弱い場合には評価指標として適切でないことが分かる。

4.1.3 S パラメータのばらつきによる方法

図 6 に、金属異物の存在の有無による反射係数の標準偏差 σ_r を示す。金属異物がない場合の σ_r の最大値 -59dB をしきい値として設定し、この値を上回ったときに金属異物を検出できることがわかる。また、金属異物がないときの最大値と有るときの最小値の差 24dB が、検出のためのマージンとなる。

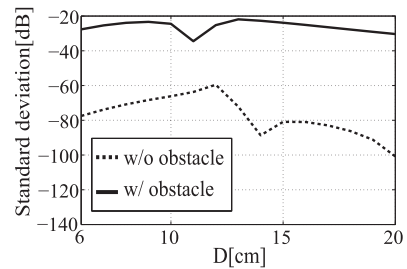
図 6 反射係数の標準偏差 σ_r の伝送距離特性

Fig. 6 Effect of distance between Tx and Rx on σ_r .

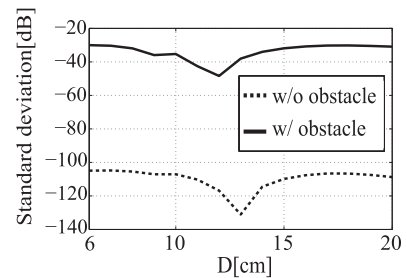
図 7 伝送係数の標準偏差 σ_t の伝送距離特性

Fig. 7 Effect of distance between Tx and Rx on σ_t .

図 7 に、伝送係数の標準偏差 σ_t を示す。金属異物がない場合の σ_t の最大値 -104dB をしきい値として設定し、この値を上回ったときに金属異物を検出できることがわかる。また、金属異物がないときの最大値と有るときの最小値の差 55dB が、検出のためのマージンとなる。

反射係数・伝送係数の標準偏差を用いる方法は、ともに異物を検出することができるが、伝送係数を用いる方が、より大きなマージンをもっているため、異物検出に適していると言える。

4.2 伝送距離特性における検出率による検出優劣の定量評価

4.2.1 シミュレーション方法

提案法の検出精度の優劣を検出率を以て定量的に示すために、雑音を考慮したシミュレーションを行った。4.1.1 のシミュレーションで計算された S パラメータに雑音を想定した観測誤差を与える。異物が存在しないときの各評価指標の計算を 1000 回行い、計算された評価値の最大値若しくは最小値をしきい値とする。異物が存在するときの EDOF、条件数及び標準偏差 σ_r 、 σ_t の評価値がしきい値を越えた場合に検出したと判定し、判定された回数から検出率を算出し、検出率を以て四つの検出方法の優劣を決定する。雑音は

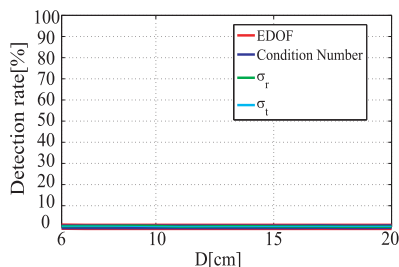


図 8 SNR=20dB 時の検出率
Fig. 8 Detection rate of four detection method at SNR=20dB.

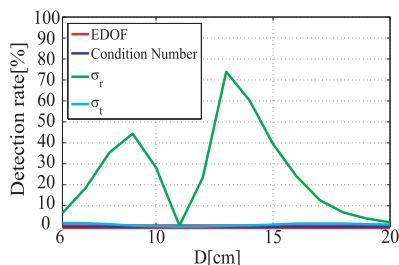


図 9 SNR=30dB 時の検出率
Fig. 9 Detection rate of four detection method at SNR=30dB.

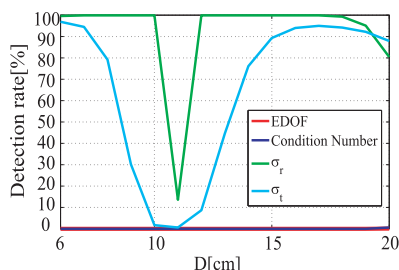


図 10 SNR=40dB 時の検出率
Fig. 10 Detection rate of four detection method at SNR=40dB.

SNR=20dB, 30dB, 40dB とする。

4.2.2 シミュレーション結果

SNR=20dB としたときの検出率を図 8 に示す。このときはいずれの評価値でも異物を検出できないことがわかる。これは、異物が存在することによる各評価値へ与える影響よりも、雑音による各評価値へ与える影響が大きかったためと考えられる。

SNR=30dB としたときの検出率を図 9 に示す。反射係数の標準偏差 σ_r を用いた方法は $D=9\text{cm}$, 13cm のときに検出率がそれぞれ 44%, 73% になっており空き缶サイズの異物を一部検知できていることがわかる。

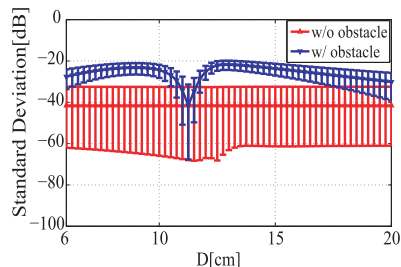


図 11 SNR=40dB における雑音を考慮した反射係数の標準偏差 σ_r
Fig. 11 Error bar of σ_r at SNR=40dB.

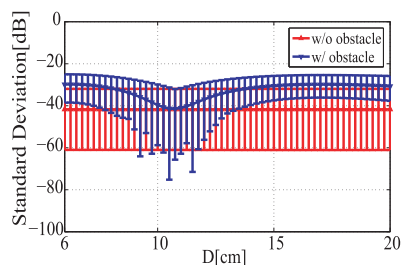


図 12 SNR=40dB における雑音を考慮した伝送係数の標準偏差 σ_t
Fig. 12 Error bar of σ_t at SNR=40dB.

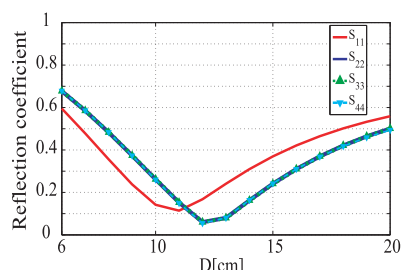


図 13 異物侵入時の各反射係数
Fig. 13 Distance between Tx and Rx characteristics of the reflection coefficient.

SNR=40dB としたときの検出率を図 10 に示す。反射係数の標準偏差 σ_r を用いた方法は $D=11\text{cm}$ を除き、高い検出率であることがわかる。伝送係数の標準偏差 σ_t は $D=11\text{cm}$ 付近で検出率が大きく落ちており、送受電間距離が非常に近い状態か、 $D=15\sim 20\text{cm}$ で検出できることがわかる。

$D=11\text{cm}$ のときに検出率が低くなっている原因について考察する。SNR=40dB における標準偏差 σ_r , σ_t の評価値の雑音に対する最大値及び最小値の範囲をそれぞれ図 11, 12 に示す。赤線は異物が存在しないときの、青線は異物が存在するときの標準偏差の平均

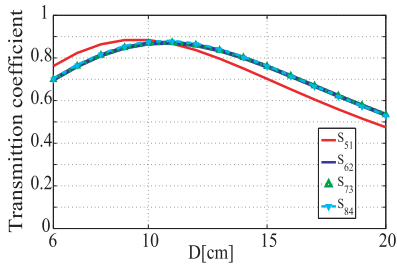


図 14 異物侵入時の各伝送係数
Fig. 14 Distance between Tx and Rx characteristics of the transmission coefficient.

値を表す。エラーバーは雑音を考慮した際の標準偏差の最大値と最小値を示す。図 11, 12 より, $D=11\text{cm}$ 付近で異物が存在するときの標準偏差の最小値が, 異物が存在しないときの標準偏差の最大値より下回っているため, 検出率が低くなったことがわかる。この $D=11\text{cm}$ で標準偏差が落ちている原因を考察するため, 四つの反射係数及び四つの伝送係数を計算したものを図 13, 14 に示す。図 13, 14 より, 異物の存在により第 1 素子の共振周波数が変化し, 動作周波数での結合が弱くなった結果, 四つの反射係数及び四つの伝送係数が $D=11\text{cm}$ で一致した事が標準偏差が低くなった原因として考えられる。

以上の結果から, EDOF や条件数を用いた評価法は位置ずれ耐性に弱いため, 無線電力伝送における金属異物検出には適さないことが明らかになった。また, 無線電力伝送では数 W~数 kW の電力を伝送し, SNR は十分に取れるため, 反射・伝送係数の標準偏差を用いる方法が適しているといえる。

5. シミュレーションによる S パラメータの標準偏差を用いた評価法の更なる検討

5.1 金属異物の位置特性

5.1.1 シミュレーションモデル

前章では異物の位置を固定して, 4 個の評価方法について比較を行い, EDOF による評価法及び, 条件数を用いた評価法は金属異物検出には適さないことがわかった。よって本章では, 反射・伝送係数の標準偏差を用いた評価法の更なる検討を行う。本節は, 反射・伝送係数の標準偏差を用いた評価法の金属異物の位置に対する影響を検討する。

図 2 に示すシミュレーションモデルにおいて, 金属異物を $(-50\text{cm} < (x, y) < 50\text{cm})$ の範囲で動かしたときの標準偏差 σ_r , 及び σ_t を計算した。異物モデル

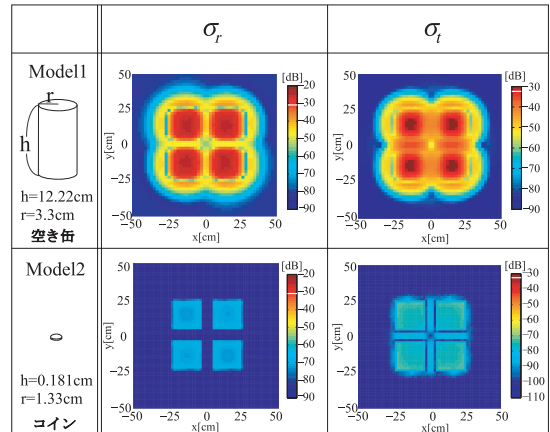


図 15 標準偏差の異物の位置に対する特性
Fig. 15 Effect of obstacle position on Standard Deviation.

は図 3 に示す空き缶サイズ, コインサイズのモデルを用いた。両方のモデルともアルミニウムの導電率を用い, 内部は中空である。計算は, モーメント法による電磁界シミュレーションにより行った。

5.1.2 シミュレーション結果

金属異物の位置による標準偏差の変動を求めた結果を図 15 に示す。カラースケールは, その位置に異物の中心が存在する場合の σ_r , 及び σ_t を示す。また, 図中のカラーバーにおける白線はしきい値を示す。標準偏差 σ_r のしきい値は, 図 11 より, 異物が存在しないときの評価値の最大値である -31dB , 標準偏差 σ_t のしきい値は図 12 より異物が存在しないときの評価値の最大値である -32dB である。この値より上回っているときに, 異物の存在を検出できることになる。

空き缶サイズのモデルでは, 反射係数の標準偏差 σ_r を用いたとき, 各送電コイル上に異物が存在するときは正しく検出できることがわかる。伝送係数の標準偏差 σ_t を用いたときは, 各送電コイルの中心部に異物が存在するときに正しく検出することができる。一方, コインサイズのモデルでは, どの位置においても σ_r , σ_t ともにしきい値を下回り, 検出できないことがわかる。これは, 金属異物のサイズが小さいために, 金属表面に流れる渦電流が小さくなり, それによる電磁界の擾乱が小さかったためであると考えられる。

5.2 受電アレーの位置ずれ特性

5.2.1 シミュレーションモデル

本節では受電アレーの横ずれにより, 異物が存在しないにもかかわらず検知したと判定してしまう誤検知

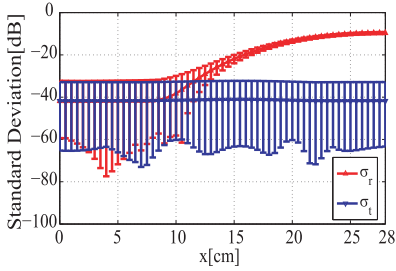


図 16 SNR=40dB における受電アレーが位置ずれしたときの雑音を考慮した標準偏差 σ_r 及び σ_t

Fig. 16 Effect of Rx array position on Standard Deviation at SNR=40dB.

について検討する。

図 1 に示す異物なし時のシミュレーションモデルにおいて、受電アレー全体を x 軸方向に ($0\text{cm} < x < 28\text{cm}$) の範囲で動かしたときの標準偏差 σ_r 、及び σ_t を計算した。なお、シミュレーションは 4.2.1 と同様に雑音を考慮し、SNR は 40dB とする。

5.2.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 16 に示す。赤線及び青線はそれぞれ σ_r 、 σ_t の試行による平均値を表す。エラーバーは雑音を考慮した際の標準偏差の最大値と最小値を示す。前節と同様に、反射係数の標準偏差 σ_r を用いた方法はしきい値 -31dB を越えたとき、伝送係数の標準偏差 σ_t を用いた方法はしきい値 -32dB を越えたときに異物が存在しないにもかかわらず検知したと誤判定してしまう。

図 16 より、反射係数の標準偏差 σ_r を用いると、受電アレーが x 軸方向に 10cm 以上ずれたとき、異物が存在しないにもかかわらず誤検知してしまうことがわかる。一方で、伝送係数の標準偏差 σ_t を用いると、受電アレーが x 軸方向にずれても誤検知しないことがわかった。

反射係数の標準偏差 σ_r を用いた方法に誤検知が発生する原因を考察する。図 1 より、受電アレーが横ずれするにつれて第 1 送電素子及び第 2 送電素子是对向するアンテナが存在しなくなる。一方で、第 3 送電素子には第 1 受電素子が、第 4 送電素子には第 2 受電素子是对向するアンテナとして存在するために四つの反射係数にばらつきが生じたと考えられる。また、伝送係数は四つの伝送係数が等しく劣化していくために誤検知しなかったと考えられる。以上のことから、受電アレーの位置ずれ耐性を必要とする場合、伝送係数の標準偏差 σ_t を用いる必要があることがわかる。

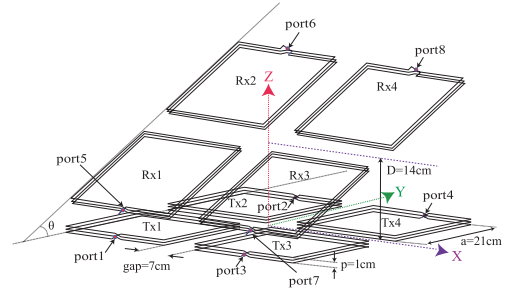


図 17 受電アレー傾き変動モデル $\theta = 30[\text{deg}]$

Fig. 17 Simulation model of varying receiving array slope.

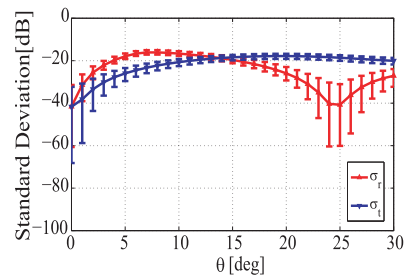


図 18 SNR=40dB における受電アレーが傾いたときの雑音を考慮した標準偏差 σ_r 及び σ_t

Fig. 18 Effect of Rx array's slope on Standard Deviation at SNR=40dB.

5.3 受電アレーの傾き特性

5.3.1 シミュレーションモデル

本節では受電アレーが傾くことによって、異物が存在しないにもかかわらず検知したと判定してしまう誤検知について検討する。図 17 にシミュレーションモデルを示す。図に示すように、受電アレー全体を受電アレー平面上の x 軸に対して ($0[\text{deg}] < \theta < 30[\text{deg}]$) の範囲で傾けたときの標準偏差 σ_r 、及び σ_t を計算した。なお、シミュレーションは 4.2.1 と同様に雑音を考慮し、SNR は 40dB とする。

5.3.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 18 に示す。赤線及び青線はそれぞれ σ_r 、 σ_t の試行による平均値を表す。エラーバーは雑音を考慮した際の標準偏差の最大値と最小値を示す。前節と同様に、反射係数の標準偏差 σ_r を用いた方法はしきい値 -31dB を越えたとき、伝送係数の標準偏差 σ_t を用いた方法はしきい値 -32dB を越えたときに異物が存在しないにもかかわらず検知したと誤判定してしまう。

図 18 より、受電アレーが 2 度以上傾くと、反射係

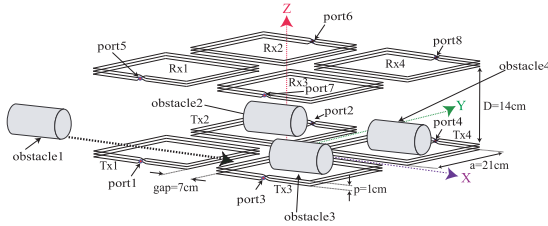


図 19 複数異物侵入モデル

Fig. 19 Simulation model of four obstacles.

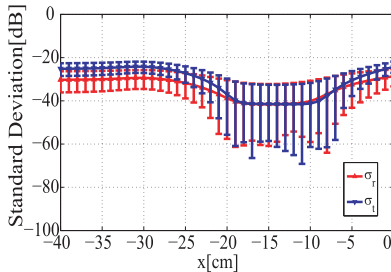
図 20 SNR=40dB における複数異物が存在するときの雑音を考慮した標準偏差 σ_r 及び σ_t

Fig. 20 Effect of four obstacle on Standard Deviation at SNR=40dB.

数並びに伝送係数の両方が四つの S パラメータにばらつきが生じ、異物が存在しないにもかかわらず、誤検知してしまうことがわかる。

誤検知してしまった原因として、受電アレーの傾きにより四つの反射係数及び伝送係数にばらつきが生じてしまったためである。

5.4 複数異物侵入時の特性

5.4.1 シミュレーションモデル

本節では、それぞれの送電素子上に異物が存在することにより異物が存在するにもかかわらず異物なしと判定してしまう誤検知について検討する。図 19 にシミュレーションモデルを示す。obstacle2, 3, 4 はそれぞれ第 2 素子上、第 3 素子上、第 4 素子上に配置する。obstacle1 は $y=-14\text{cm}$ かつ $(-40\text{cm} < x < 0\text{cm})$ の直線上で動かしたときの標準偏差 σ_r 、及び σ_t を計算した。なお、シミュレーションは 4.2.1 と同様に雑音を考慮し、SNR は 40dB とする。

5.4.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 20 に示す。赤線及び青線はそれぞれ σ_r 、 σ_t の試行による平均値を表す。エラーバーは雑音を考慮した際の標準偏差の最大値と最小値を示す。本節では、反射係数の標準偏差 σ_r を用いた方法はしきい値 -31dB を下回ったとき、伝送係

数の標準偏差 σ_t を用いた方法はしきい値 -32dB を下回ったときに異物が存在するにもかかわらず異物なしと誤判定する。

図 20 より obstacle1 が第 1 素子上に存在する $(-24.5\text{cm} < x < -3.5\text{cm})$ で標準偏差が低くなり、異物が存在するにもかかわらず異物を検知できないことがわかる。これは各送電素子上に異物が存在することにより、四つの反射係数及び伝送係数が等しく劣化することで、ばらつきが生じなくなり標準偏差が小さくなってしまったことが原因である。

6. む す び

結合共振型無線電力伝送用のアレーアンテナを用いて、金属異物を検出する方法を提案した。評価指標としてチャネル行列による方法と反射・伝送係数のばらつきによるものを検討した。チャネル行列による方法では、アンテナ間隔や伝送距離が波長に対して非常に小さいため、検出は可能ではあるものの、送受電距離の変化による影響の方が大きいため、検出法として適切ではないことが明らかになった。一方、S パラメータの標準偏差による方法は、受電アレーが横ずれ 10cm 以内、傾きが水平に対して 1 度以内、全ての送電素子上に異物がない場合において、反射係数の標準偏差 σ_r を用いるだけで金属異物を検出することができた。また、受電アレーの位置ずれ耐性を必要とする場合、伝送係数の標準偏差 σ_t を用いる必要があることがわかった。

無線電力伝送用アンテナにアレーアンテナを用いた場合、素子アンテナへの給電振幅・位相を調整することにより、位置ずれによる電力伝送効率の低下を防ぐという応用が考えられる。この場合、各素子の状態を監視するために、CM カップラーなどを用いて素子ごとの反射・伝送係数をモニターすることになる。このようなハードウェアを流用することにより、ハードウェアの追加なしに異物検出を行えることが、本手法のメリットである。

本手法は、S パラメーターそのものの変化ではなく、ばらつきを用いていることが特徴である。そのため、負荷側のインピーダンスの変化や装置の経年変化など、外部要因による S パラメータの変化が発生しても、4 個の素子について同じ変化であれば影響を受けないことが特徴である。しかし、周辺物体の影響など、非対称な変化に対しては誤動作の要因となるため、この対応については今後の課題である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費基盤研究 C 24560453 の助成を受けたものです。

文 献

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science Magazine*, vol.317, no.5834, pp.83–86, July 2007.
- [2] 工藤浩喜, 大館紀章, 小川健一郎, 庄木裕樹, "磁気共鳴型無線電力伝送における送受電コイルでの近接物検出方法の提案," 2010 信学ソ大 (通信), B-1-3, Sept. 2010.
- [3] K. Miwa, H. Mori, N. Kikuma, H. Hirayama, and K. Sakakibara, "A consideration of efficiency improvement of transmitting coil array in wireless power transfer with magnetically coupled resonance," *Proc. WPTC 2013*, pp.13–16, May 2013.
- [4] K. Ushiki, K. Nishimori, N. Honma, and H. Makino, "Intruder detection performance of SIMO and MIMO sensors with same number of channel responses," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E96-B, no.10, pp.2499–2505, Oct. 2013.
- [5] N. Honma, K. Nishimori, H. Sato, and Y. Tsunekawa, "Compact Antenna Arrangement for MIMO Sensor in Indoor Environment," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E96-B, no.10, pp.2491–2498, Oct. 2013.
- [6] D.S. Shiu, G.J. Foschini, M.J. Gans, and J.M. Kahn, "Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol.48, no.3, pp.502–513, March 2000.
- [7] H. Hirayama, G. Matsui, N. Kikuma, and K. Sakakibara, "Channel capacity improvement in short-range MIMO using side and back reflectors," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E94-B, no.5, pp.1280–1283, May 2011.

(平成 26 年 11 月 18 日受付, 27 年 3 月 11 日再受付)



平山 裕 (正員)

平 10 電通大・電子情報卒, 平 12 同大学院博士前期課程了, 平 15 同大学院博士後期課程了, 同年電通大リサーチアソシエイトを経て名工大助手, 平 19 同助教, 平 25 同准教授, 現在に至る. 博士 (工学). アンテナ及び環境電磁工学, 無線電力伝送の

研究に従事.



菊間 信良 (正員:フェロー)

昭 57 名工大・工・電子卒, 昭 62 京大大学院博士課程了, 同年同大助手. 昭 63 名工大助手, 平 2 同講師, 平 4 同助教, 平 13 同教授, 現在に至る. 工博. アダプティブアレー, 多重波伝搬解析, 構内無線通信, 無線電力伝送の研究に従事, 第 4 回電気通信普及財団賞受賞. 著者「アダプティブアンテナによる適応信号処理」, 「アダプティブアンテナ技術」等. IEEE シニア会員.



榊原久二男 (正員:シニア会員)

平 3 名工大・工・電気情報卒, 平 8 東大大学院博士課程了, 同年 (株) 豊田中央研究所入社. 平 14 名工大講師, 平 16 同助教, 平 19 同准教授, 平 24 同教授, 現在に至る. 平 12~13 独国ウルム大学客員研究員. 工博. ミリ波アンテナ, 移動体通信アンテナの研究に従事. IEEE シニア会員.



矢満田博之 (学生員)

平 25 名工大・工・電気電子卒, 平 27 同大学院博士前期課程了. 現在, トヨタ自動車株式会社に勤務.