

A field experiment of a microwave power transmission system and Study on direction-of-arrival estimation methods robust against noise

Fumito Takahashi, Kozo Hashimoto, Naoki Shinohara, Tomohiko Mitani
Reserch Institute for Sustainable Humansphere, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

Abstract

In our laboratory, we have studied microwave power transmission with mainly indoor experiment using an anechoic chamber. But the microwave power transmission will be practically used outside such as SPS(Solar Power Satellite). Because our experimental systems are too large and heavy to experiment outside, we need to develop a field experiment system which must be light, small, and low cost. Outside noises and interference waves make the accuracy of DOA estimation worse, and we have to study DOA estimation methods robust against noise to eliminate this effect.

We developed a field experiment system of a microwave power transmission system composed of a beam transmitting system and a pilot signal transmitting system. We acquired a radio station licence for a field experiment on May 5, 2008. There are two ideas for field experiments, one is to inspect the behavior of the software retro directive system, and another is an airship experiment planned by our institute.

In the airship experiment we estimate DOA with the developed field experiment system. On the DOA estimation system we eliminate offset and convert the normalized waveforms to the complex after A/D conversion. Then we estimate DOA from the phase difference between two antenna elements. We performed an indoor and field experiment with this estimation system. In the indoor experiment we changed the distance between receiving antennas to evaluate the accuracy of DOA estimation. This experimental result showed that the estimation system could totally estimate the DOA accurately. As we changed the distance shorter, the accuracy became worse. In the field experiment we compared the results with those of the indoor experiment. Although this experiment result was worse than that of the indoor experiment, we considered that there were no problems to use this estimation system in the airship experiment.

We also studied "TF-MUSIC" (Time Frequency MUSIC) method, a DOA estimation methods robust against noise compared with the MUSIC method. This method estimates DOA on the time-frequency domain and we adopted Wigner-Ville Distribution as a time-frequency distribution. If we use autocorrelation matrix of Wigner-Ville Distribution as that of MUSIC method, we can perform DOA estimation with a algorithm of MUSIC method. We compared these methods and found the superiority of TF-MUSIC method to MUSIC method in low SNR.

マイクロ波送電屋外実験系の開発 及び雑音に強い到来方向推定法の研究

高橋 文人, 橋本 弘藏, 篠原 真毅, 三谷 友彦
京都大学 生存圏研究所
611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

1 背景と目的

現在研究が行われているマイクロ波送電は、宇宙太陽発電衛星 (SPS:Solar Power Satellite) や電気自動車に対する充電などへの応用が考えられている。このマイクロ波送電では所望の方向へ正確に送電するために、受電側から送信されたパイロット信号の到来方向送電側で推定し、推定した方向へマイクロ波を送信するソフトウェアレトロディレクティブシステムを用いて、ビーム制御を行う。正確なビーム制御を行うためには、精度の高い到来方向推定が求められる。これまで本研究室では、マイクロ波エネルギー伝送実験装置 (METLAB: Microwave Energy Transmission LABoratory) 内の電波暗室などを利用した屋内実験を中心に到来方向推定法やビーム制御法などの研究を行ってきた [1][2]。しかし、実際にはマイクロ波送電は主に屋外で用いられることが想定され、これまで用いてきた 5.8 ギガ宇宙太陽発電無線電力伝送システム (SPORTS5.8: Solar POver Radio Transmission System for 5.8GHz) は非常に大きく重たいので、屋外実験には不向きである。そこで屋外実験を行うために小型で軽量、安価な屋外送電実験系の開発が必要となった。また屋内とは異なり屋外での到来方向推定には外部雑音や干渉波などの影響が生じる恐れがあるので、雑音に強い到来方向推定法の研究が必須である。そこで本研究では屋外でマイクロ波送電実験を行うための系の開発や、雑音や他の電波による影響を受けにくい到来方向推定法の研究や改良を行うことを目的とする。

2 マイクロ波送電屋外実験系の開発

2.1 屋外実験系の仕様及び構造

本研究において開発したマイクロ波屋外送電実験系の仕様を表 1 に示す。ビーム送電系は 16 素子から構成されるリニアアレイであり、各素子 10mW 計 0.16W を出力する。2008 年 5 月 21 日に近畿総合通信局の落成検査を受け、無線局免許を取得した。この屋外実験系は昨年度製作されたものを基本に開発を行ったが、本研究では主にパイロット信号送信系の改良を行った。

パイロット信号送信系の構成図を図 1 に示す。1 つの信号発生器 (SG) から出力された 2.449GHz の信号が周波数逡倍器を経て 4.898GHz に倍増され、この信号と別の SG から出力された 902MHz の信号をミキサに入力し、バンドパスフィルタと増幅器を経て最終的な出力 5.8GHz, 20dBm を得る。屋外送電実験系の開発において、小型化・軽量化を実現するために従来の SG ではなく、Comblock 社の COM4001 を採用した。この COM4001 は出力可能周波数が 902~928MHz, 2.025~2.5GHz であり、単体で 5.8GHz の信号を生成できないので、図 1 のように 2 つのラインを用いた。また COM4001 には発振モードとして内部発振と外部発振があ

表 1 屋外送電実験系の仕様

	ビーム送電系	パイロット信号送信系
周波数	2.460GHz	5.800GHz
出力	0.16W (22.04dBm)	0.1W (20dBm)
帯域幅	—	1.4MHz
変調方式	無変調	無変調 BPSK スペクトル拡散

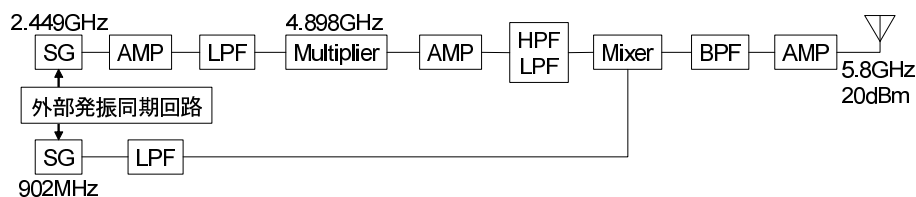


図1 パイロット信号送信系の構造

るが、内部発振を用いると周波数が変動しやすく不安定であるので、後述する到来方向推定に影響が生じる。そこで本研究では 10MHz の温度補償水晶発振器を搭載した外部発振同期回路を製作し、SG に用いることで安定した周波数を得ることが出来た。

2.2 想定している屋外実験

本研究で想定している屋外実験には 2 つある。1 つ目は地上屋外実験である。この実験の目的はソフトウェアレトロディレクティブシステムの検証であり、パイロット信号を 5.8GHz 4 素子リニアアレイを用いて受信し、推定した到来方向に向けて 2.46GHz 16 素子 1 次元フェイズドアレイからマイクロ波を送電する。送受信部の配置は、地上に平行な配置や建物の屋上などからパイロット信号を送信するような地上に垂直な配置を想定している。2 つ目の屋外実験は飛行船実験である [3]。この実験については、次章で述べる。

3 飛行船実験に向けた到来方向推定実験

3.1 飛行船実験の概要

本年度実施が予定されている飛行船実験では、地上から 25m の高さに浮上させた飛行船に対して地上側からパイロット信号を送信し、飛行船上において到来方向を推定し、その方向に対して電力を送信し、地上側でレクテナにおいて受信・整流された電力を用いて携帯電話の充電や発光ダイオードの点灯などを行う予定である。また電力送電を行うとともに、搭載するマグネトロン等を監視するために無線 LAN を用いたテレメトリを実施する予定である。パイロット信号には 5.8GHz・20dBm(0.1W)、無線送電には 2.46GHz・23.4dBW(220W) を用いる。地上の受電側中心における電力密度は、 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ を想定している。飛行船実験では、本研究で開発したパイロット信号送信部やパイロット信号受信部、到来方向推定システムが用いられる。またパイロット信号受信部のアンテナ素子数は 2 素子である。

3.2 到来方向システムについて

パイロット信号受信部の構成図を図 2 に示す。受信した 5.8GHz のパイロット信号と、パイロット信号から 25kHz 離れた周波数の信号を共にミキサに入力し、ローパスフィルタを経て 25.5kHz まで周波数をダウンコンバートする。ダウンコンバートされた信号をサンプリング周波数 120kHz で A/D 変換し、パソコンに取り込まれたデータから到来方向を推定する。サンプリング後のパソコン上での処理は、オフセットを除去し振幅により正規化された波形を複素数化する。次に各サンプリング点において 2 つの波形の位相差を求め、全サンプリング点においてこの作業を行った後に全サンプリング点の平均値を素子間位相差 α とし、リニアアレイにおける素子間位相差は $kd \sin \theta_0$ (k : 波数, d : 素子間隔, θ_0 : 到来方向) であることから到来方向 θ_0 は $\theta_0 = \sin^{-1}(\alpha/kd)$ と求めることが出来る。

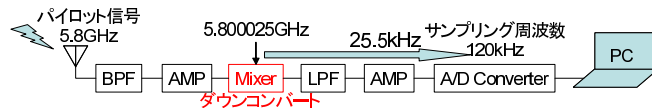


図2 パイロット信号受信部の構成図

3.3 屋内実験

電波暗室内において屋内実験を行った。送受信間距離は飛行船実験での25mに対して屋内実験では5.485mであったので、受信電力を飛行船実験と等しくするためにフリスの伝搬公式から逆算した結果、パイロット信号送信部に10dBの減衰器を挿入して出力を10dBmに抑えた。また受信アンテナ間隔を30cm(5.8λ),24cm(4.64λ),15cm(2.9λ)の3通りに設定し、到来方向推定精度を検証した。各角度に対して、100回試行した実験結果の一部を表2,3に示す。

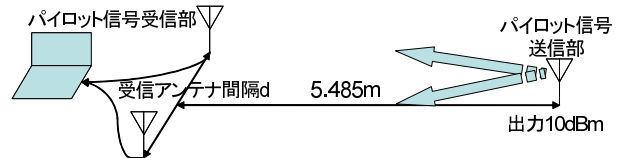


図3 屋内実験 配置図

表2 屋内実験の結果：平均推定結果のずれ

到来方向	受信素子間隔		
	30cm	24cm	15cm
-2°	0.08°	0.08°	0.31°
-1°	0.04°	0.00°	0.19°
0°	0.01°	0.00°	0.19°
1°	-2.29°	-1.04°	-1.14°
2°	0.17°	1.05°	7.54°
3°	0.14°	0.12°	1.21°
4°	0.00°	0.01°	0.52°
5°	0.03°	-0.02°	0.50°

表3 屋内実験の結果：最大値 - 最小値

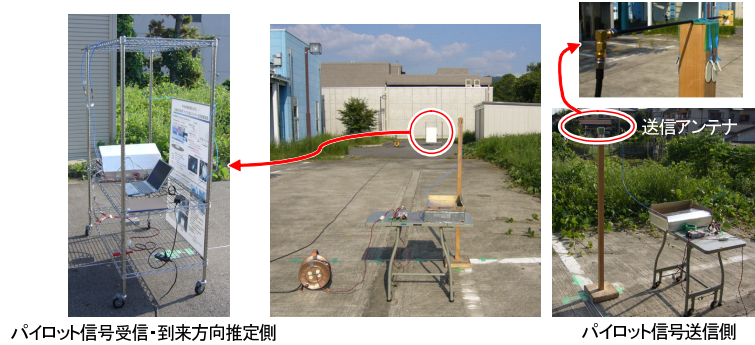
到来方向	受信素子間隔		
	30cm	24cm	15cm
-2°	0.10°	0.09°	0.26°
-1°	0.14°	0.14°	0.23°
0°	0.25°	0.22°	0.65°
1°	2.30°	2.32°	3.37°
2°	0.71°	2.14°	3.51°
3°	0.20°	0.27°	2.15°
4°	0.10°	0.12°	0.50°
5°	0.08°	0.11°	0.19°

表2,3より全体的にほぼ正確に到来方向を推定できたことがわかる。アンテナ間隔が30cm,24cmの場合には推定精度に大きな違いは見られなかったが、15cmの場合には若干推定精度が落ちることを確認した。また到来方向を1°から2°に変化させたときに素子間位相差に2π印加しているが、この前後で推定精度が大きく悪化する現象が見られた。この現象の原因については次節で述べる。

3.4 屋外実験

METLAB 横の敷地において屋内実験と同様に屋外実験を行った。屋外実験では屋内実験とは異なり送受信間距離を飛行船実験と同じ25mにしたので、パイロット信号送信部の出力は20dBmである。また受信アンテナ間隔は24cmに固定し、屋内実験時の結果と比較した。実験時の様子を図4、実験結果を表4に示す。

表4と表2,3より、屋内実験に比べて屋外実験では推定精度が悪くなったが、実際に飛行船実験に応用できないほど悪い結果ではなかった。屋外実験において推定精度が悪くなった原因の1つとして、屋外実験ではサンプリング後の波形が一部汚い場合があったことが考えられる。また風によってパイロット信号送信アンテナがぶれてしまったり、屋内実験ではXYポジションを用いて正確にパイロット信号送信部を移動できたのに対して、屋外実験では手で移動させたことによる測定誤差なども推定精度が悪化した原因である。また屋外実験でも屋内実験時と同様に、素子間位相差に2π印加した前後で推定精度が大きく悪化する現象が見られた。この現象の主な原因は、素子間位相差がπと-πの間を大きく変動し、到来方向を行う際には変動する素子間



パイロット信号受信・到来方向推定側

図4 屋外実験

パイロット信号送信側

表4 屋外実験の結果

到来方向 (°)	平均推定結果のずれ	最大値 - 最小値
0°	-0.01°	0.35°
1°	-4.37°	2.23°
2°	0.72°	2.10°
3°	0.30°	0.33°
4°	0.24°	0.23°
5°	0.51°	0.22°

位相差を平均化した値を素子間位相差として用いたことである。この問題に対処するためプログラムを改良し、到来方向推定を行った結果印加する前後でも正しく推定することができた。

4 雑音に強い到来方向推定法の研究

4.1 TF-MUSIC 法について

到来方向推定法の代表的な方法として MUSIC 法が挙げられる。これは複数方向から到来するパイロット信号の到来方向推定アルゴリズムの1つであり、信号の相関行列の固有値、固有ベクトルを用いた高分解能な到来方向推定法である。MUSIC 法の原理は以下の通りである。アレイアンテナにおける受信素子数を K 、到来波数を L とする。アレイアンテナからの入力ベクトル $\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}s(t) + \mathbf{N}(t)$ (\mathbf{A} : 到来方向行列, $s(t)$: 到来信号, $\mathbf{N}(t)$: 内部雑音ベクトル) より相関行列 R_{xx} は次式 (1) で与えられる。

$$R_{xx} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] = \mathbf{A}E[s(t)s^H(t)]\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (\sigma^2: \text{熱雑音電力}) \quad (1)$$

この相関行列 R_{xx} より固有値、固有ベクトルを求め、熱雑音に対応する固有ベクトル $\mathbf{e}_i (i = L + 1, \dots, K)$ を用いて次式 (2) の MUSIC スペクトル P_{MU} のピークを探すことで到来方向 $\theta_1, \dots, \theta_L$ を求めることができる。

$$P_{MU}(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{E}_N\mathbf{E}_N^H\mathbf{a}(\theta)} \quad \mathbf{E}_N = [\mathbf{e}_{L+1}, \dots, \mathbf{e}_K] \quad (2)$$

MUSIC 法の欠点として SN 比が低い場合には到来方向推定精度が悪化する点が挙げられる。そこで本研究では SN 比が低い場合でも到来方向を推定できる方法として、TF-MUSIC 法の研究を行った。TF-MUSIC 法は時間 - 周波数領域において信号処理を行う到来方向推定法であり、MUSIC 法で用いた相関行列に時間 - 周波数分布行列を適用するものである。本研究ではこの時間 - 周波数分布として、Wigner-Ville 分布を用いた。Wigner-Ville 分布は時間平均を行わない時変自己相関関数のフーリエ変換というものであり、離散信号の場合には $W_{xx}(t, \omega) = \sum_{\tau=-L/2}^{L/2} \mathbf{X}(t+\tau)\mathbf{X}^H(t-\tau)e^{-j\omega\tau/L}$ で与えられる。Wigner-Ville 分布の利点は時間分解能と周波数分解能を共に高く出来る点だが、欠点として計算が複雑になる点が挙げられる。この Wigner-Ville 分布の相関行列 $R_{xx} = E[W_{xx}(t, \omega)] = \mathbf{A}W_{xx}\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I}$ を MUSIC 法における相関行列に代入することで、式 (2) を用いて MUSIC 法と同様に到来方向を推定することが出来る。

4.2 シミュレーションによる評価

シミュレーションを行って、MUSIC 法と TF-MUSIC 法の比較を行った。シミュレーションにおける条件は、到来方向が $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 、電力がそれぞれ 1.0, 1.0, 0.5 である。また受信素子数は 6 素子である。シミュレーション結果のスペクトル図を図 5, 6, 7, 8 に示す。

図 5, 6, 7, 8 より、SN 比が低い場合には MUSIC 法に比べて TF-MUSIC 法のほうがスペクトルが鋭いが、SN 比が高くなると両者に大きな違いは見られなくなることが分かる。これより SN 比が低い場合には

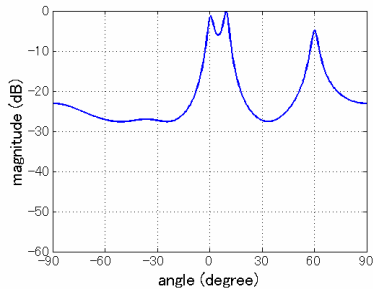


図5 MUSIC法 SNR=10dB

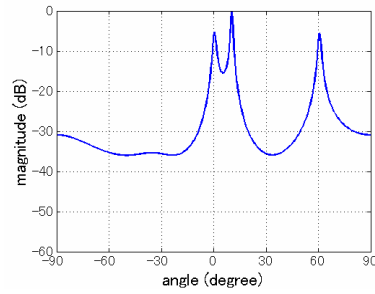


図6 TF-MUSIC法 SNR=10dB

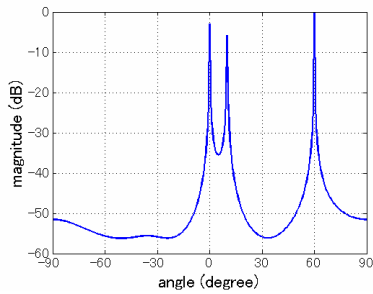


図7 MUSIC法 SNR=40dB

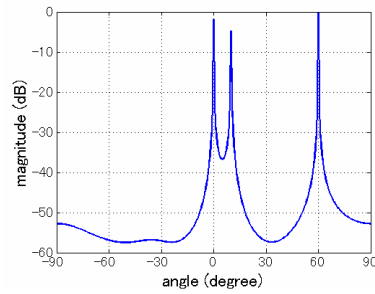


図8 TF-MUSIC法 SNR=40dB

TF-MUSIC法のほうが優れていることが分かる。また計算時間に関しては、TF-MUSIC法はMUSIC法に比べて約3倍の時間がかかった。

5 まとめと今後の課題

マイクロ波送電屋外実験系の開発を行い、屋外実験のための無線局免許を取得した。飛行船実験に用いる到来方向推定プログラムを作成し、電波暗室内において実験を行った結果、ほぼ正確に推定でき、受信アンテナ間隔を小さくすると推定精度が低下することを確認した。屋外でも実験を行った結果、屋内実験に比べて推定精度は悪化したものの、全体的に大きくずれることもなく、飛行船実験に用いることは可能だと考えられる。素子間位相差に 2π 印加する前後では到来方向推定誤差が大きかったが、これは素子間位相差が π と $-\pi$ の間を大きく変動することに起因し、この問題に対処したプログラムを用いて到来方向推定を行った結果正しく推定することができた。また雑音に強い到来方向推定法としてTF-MUSIC法の研究を行った結果、計算時間を多く消費するもののSN比が低い場合にはMUSIC法よりも優れていることが分かった。

屋外実験では今回は地面に平行な配置で実験したが、地面からの反射が入力された可能性もあり、今後は反射波を無視できるような配置で実験する予定である。今回は飛行船実験に向けた到来方向推定実験のみであったが、今後は空間平均法の導入も考慮したソフトウェアレトロディレクティブシステムの屋外実験も行う。

最後に昨年度マイクロ波屋外送電実験系を製作された平野氏、前氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 松本真俊, 宇宙太陽発電所のための自動較正機能を有する到来方向推定法に関する研究, 京都大学大学院工学研究科修士論文, (2004)
- [2] 大畑良行, マイクロ波電力伝送のためのソフトウェアレトロディレクティブシステムの研究, 京都大学大学院工学研究科修士論文, (2006)
- [3] 山川宏, 橋本弘藏, 川崎繁男, 篠原真毅, 三谷友彦, 高橋文人, 米倉秀明, 平野敬寛, 藤原暉雄, 長野賢司, 飛行船を用いたマイクロ波無線電力伝送実験: 実験概要, 第11回宇宙太陽発電システムシンポジウム, (2008)